

Jadwiga Zalewska, Grażyna Łykowska, Jan Kaczmarczyk  
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

## Rentgenowska mikrotomografia komputerowa w badaniu skał węglanowych

### Wstęp

W artykule przedstawiono wyniki badań micro-CT struktury wewnętrznej 6 próbek skał węglanowych – po dwie z poszczególnych litologii. Wapienie były reprezentowane przez próbki nr 9433 i 8764A, dolomityczny wapień przez próbki nr 9423 i 9424, a dolomit przez próbki nr 9434 i 8287.

W celu dokonania analizy numerycznej skał węglanowych, z całej próbki wycinano dwie podpróbki, o objętościach równych 1/4 próbki wyjściowej, mające wymiary  $557 \times 260 \times 879$  wokseli. W obrębie każdej pod próbki sieć porową podzielono na klasy, zgodnie z tablicą 1 [3]. Dokonano także wizualizacji przestrzennego rozkładu

porów (z podziałem na klasy) oraz narysowano wykresy udziału ilościowego i procentowego każdej z klas, zgodnie z metodyką opisaną w pracy [4]. Rozwartość szczelin mierzono przy użyciu narzędzi programu VSG Avizo [1]. Porowatość tomograficzną obliczono jako stosunek liczby wokseli należących do warstwy porów, do łącznej ilości wokseli obrazu [2]. Udział poszczególnych faz w szkieletce skalnym obliczono jako stosunek liczby wokseli należących do danej fazy, do łącznej liczby wokseli szkieletu skalnego (tzn. liczby wokseli obrazu, pomniejszonej o liczbę wokseli sieci porowej).

Tablica 1. Sposób oznaczenia objętości klas porów [5]

Objętość pora [woksel]*	1–9	10–99	100–999	1000–9999	10 000–99 999	> 100 000
Objętość poru [ $\mu^3$ ]	$2,10^2$ – $2,10^3$	$2,10^3$ – $2,10^4$	$2,10^4$ – $2,10^5$	$2,10^5$ – $2,10^6$	$2,10^6$ – $2,10^7$	> $2,10^7$
Kolor	Żółty	Niebieski	Czerwony	Zielony	Biały	Fioletowy

\* 1 woksel –  $216 \mu\text{m}^3$

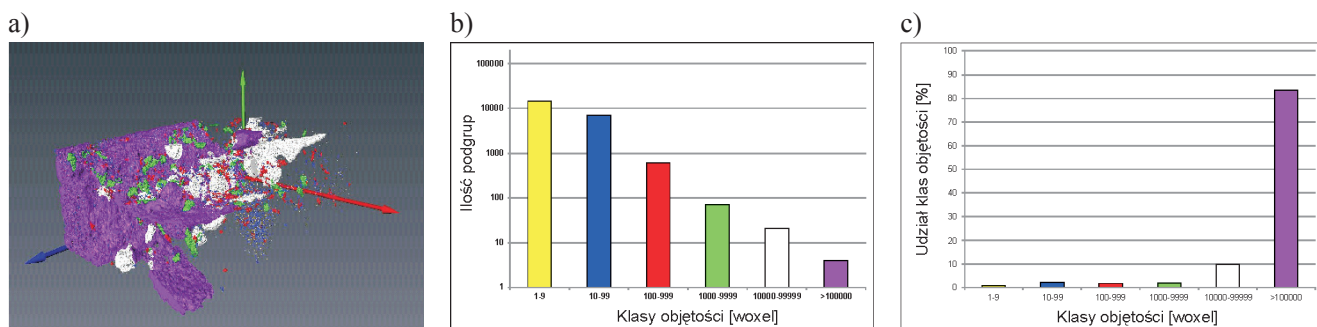
### Wapienie

Próbka 9433 to wapień przekrystalizowany, który według klasyfikacji Dunhama pierwotnie mógł być pakstonem. Na rysunkach 1 i 2 pokazano rozkład przestrzenny porów, z podziałem na klasy objętości dla dwóch pod próbek wyciętych z próbek 9433 (9433-1 – rysunek 1a i 9433-2 – rysunek 2a) oraz wykresy udziału ilościowego (9433-1 – rysunek 1b i 9433-2 – rysunek 2b) i procentowego każdej z klas (9433-1 – rysunek 1c i 9433-2 – rysunek 2c).

W pod próbce 9433-1 widać wyraźne szczeliny, stanowiące pory VI klasy objętości i zajmujące większość

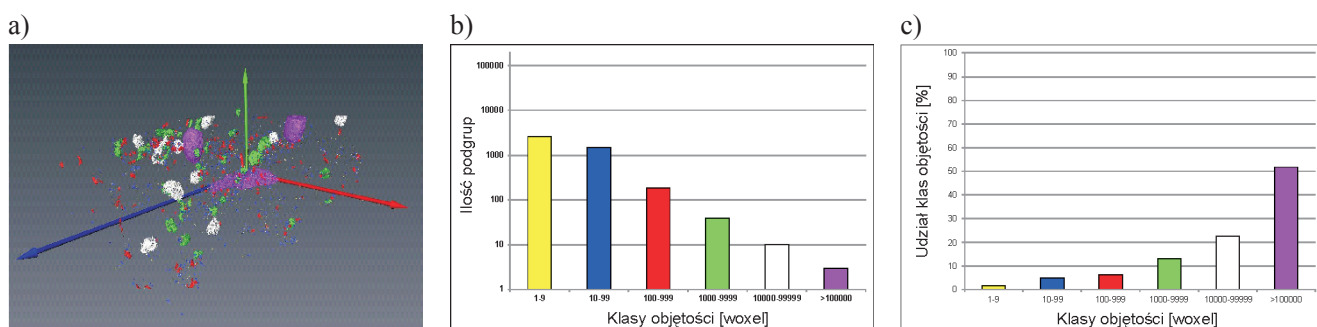
przestrzeni porowej tej pod próbki. W pod próbce 9433-2 szczeliny nie występują, przez co porowatość tej pod próbki jest dziesięciokrotnie mniejsza niż pod próbki 9433-1. Jak pokazują rysunki 1 i 2, próbka 9433 charakteryzuje się dużą anizotropią porowatości.

Na rysunku 3 zaprezentowano przekrój przez szczelinę próbki 9433. W próbce tej zaobserwowano układ bardzo wąskich, wzajemnie przecinających się szczelin, częściowo wypełnionych dolomitem, z których najbardziej widoczna posiada szerokość około  $10,00 \mu\text{m}$  i kąt roz-



Rys. 1. Analiza mikrotomograficzna próbki 9433-1 (porowatość 6,7%)

a) przestrzenny rozkład porów z podziałem na klasy, b) ilościowy udział klas porów, c) objętościowy udział klas porów



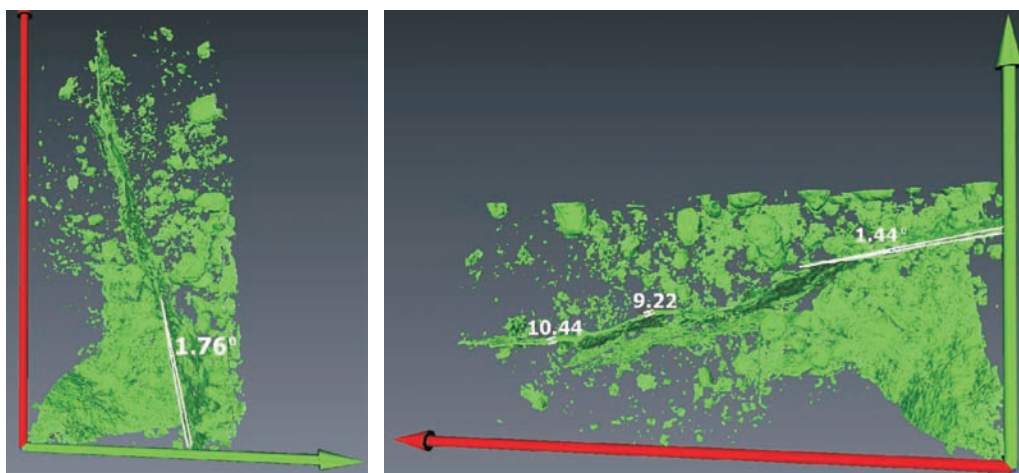
Rys. 2. Analiza mikrotomograficzna próbki 9433-2 (porowatość 0,6%)

a) przestrzenny rozkład porów z podziałem na klasy, b) ilościowy udział klas porów, c) objętościowy udział klas porów

warcia 1,76° lub 1,44° (w zależności od płaszczyzny obserwacji).

Próbka 8764 to także wapień przekształcony, który pierwotnie mógł być wulkanem. Wycięte z niej dwie próbki wykazały zróżnicowanie w zakresie ilościowego udziału klas porów w nich wydzielonych (rysunki 4b i 5b). W próbce 8764-2 dominują klasy porów wielkości I–III, co mogło zdecydować o jej większej porowatości (10,9%) niż próbki 8764-1.

Rysunki 4 i 5 pokazują, że w próbce 8764 praktycznie cała porowatość pochodzi od szczeliny przebiegającej diagonalnie przez wybrany do analizy fragment skały. Zaobserwowana szczelina w obydwu próbkach stanowi ok. 99% objętości przestrzeni porowej. Pory należące do pozostałych klas objętości występują w małych ilościach i pojawiają się tylko w okolicy szczeliny.

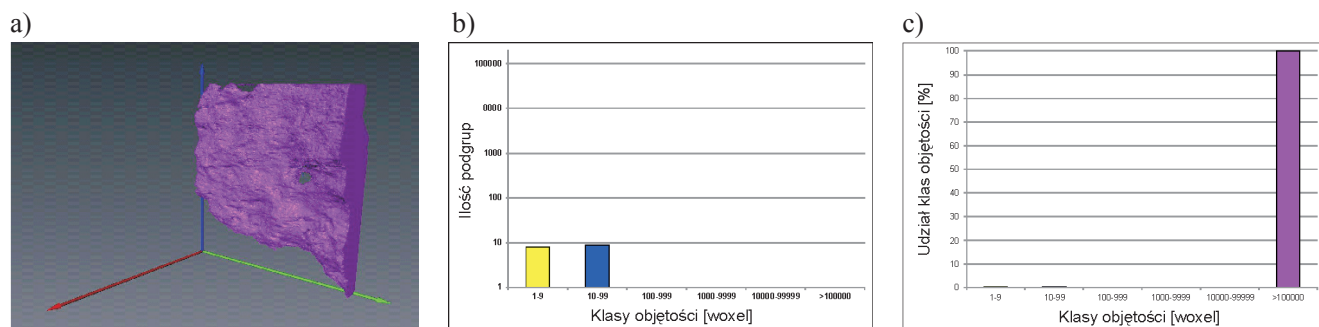


Rys. 3. Obraz mikrotomograficzny przekroju przez szczelinę próbki 9433

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

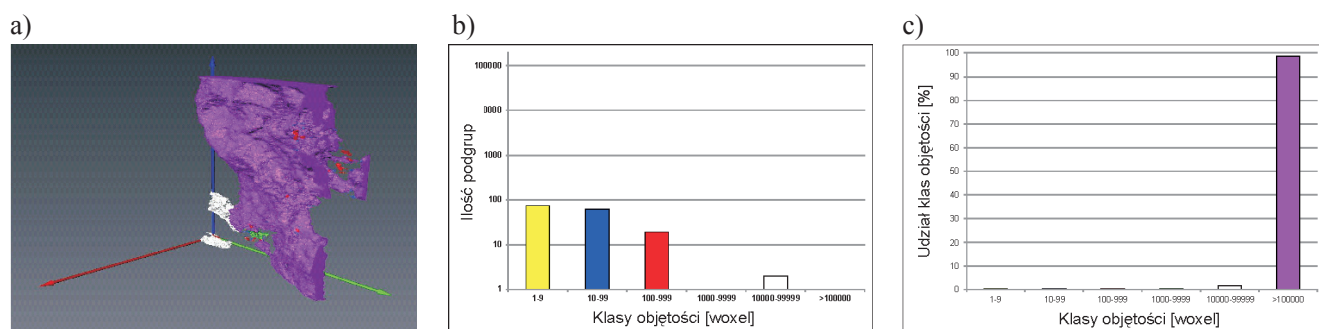
Przedstawione na rysunku 6 wizualizacje szczeliny pokazują jej rozwój w różnych płaszczyznach obserwacji. W wyniku analizy obrazów tomograficznych próbki wapienia zanotowano występowanie jednej szczeliny o zmiennej szerokości – od 18,97 μm do 98 μm i kącie rozwarcia od 4,67° do 8,94°.

Jak pokazują rysunki 1, 4 i 5, w obydwu próbkach wapienia praktycznie cała porowatość pochodzi od szczeliny obecnej w próbce.



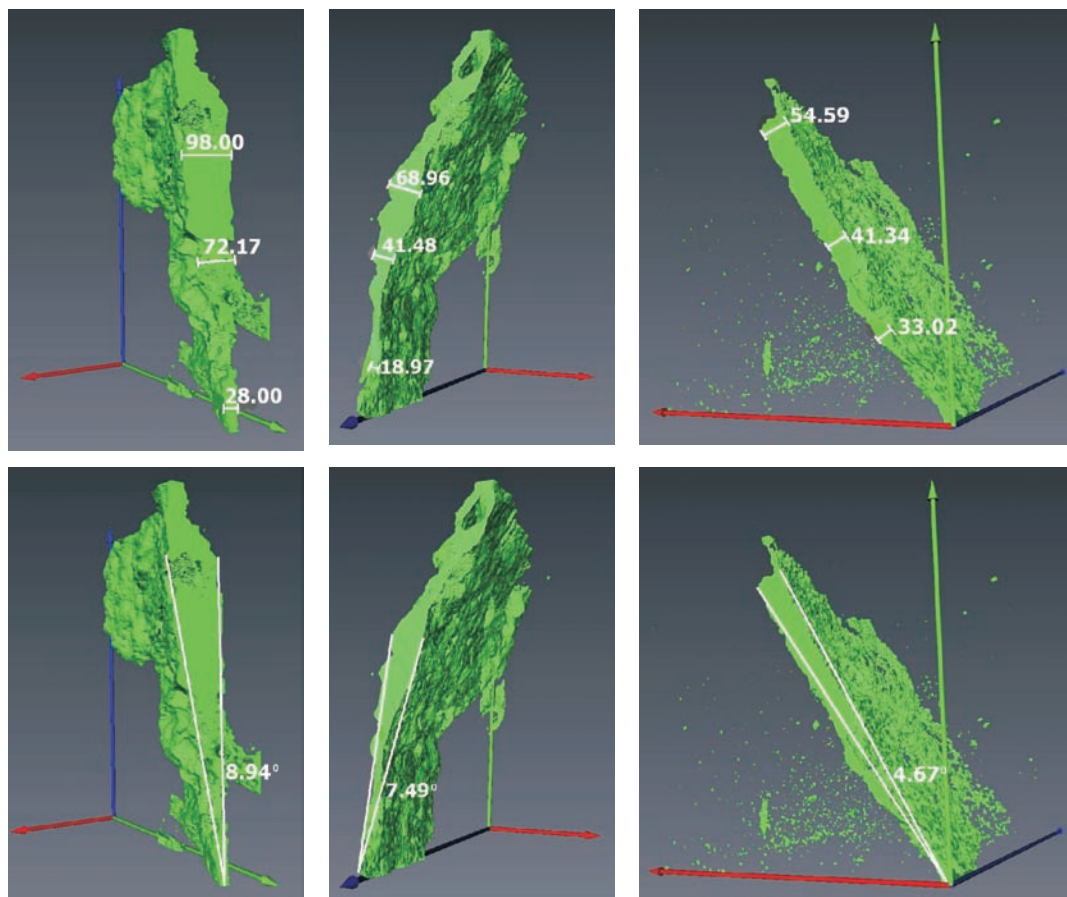
Rys. 4. Analiza mikrotomograficzna próbki 8764-1 (porowatość 8,1%)

a) przestrzenny rozkład porów z podziałem na klasy, b) ilościowy udział klas porów, c) objętościowy udział klas porów



Rys. 5. Analiza mikrotomograficzna próbki 8764-2 (porowatość 10,9%)

a) przestrzenny rozkład porów z podziałem na klasy, b) ilościowy udział klas porów, c) objętościowy udział klas porów



Rys. 6. Obraz mikrotomograficzny przekroju przez szczelinę próbki 8764

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

Wapienie dolomityczne

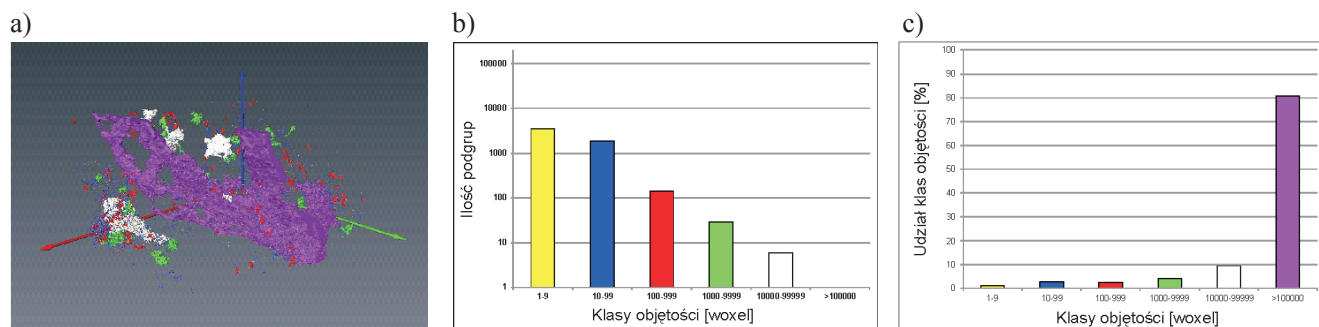
Na rysunkach 7 i 8 pokazano rozkład przestrzenny porów w próbce 9423, z podziałem na klasy dla poszczególnych podpróbek, oraz wykresy udziału ilościowego i procentowego każdej z klas.

Rysunki 7 i 8 pokazują, że w przypadku próbki 9423 szczelina (przebiegająca po przekątnej wybranego do analizy fragmentu obrazu) stanowi znaczną (80–90%) część objętości przestrzeni porowej. Pory należące do

pozostałych klas występują w dużych ilościach, jednak nie wnoszą istotnego wkładu do porowatości próbki.

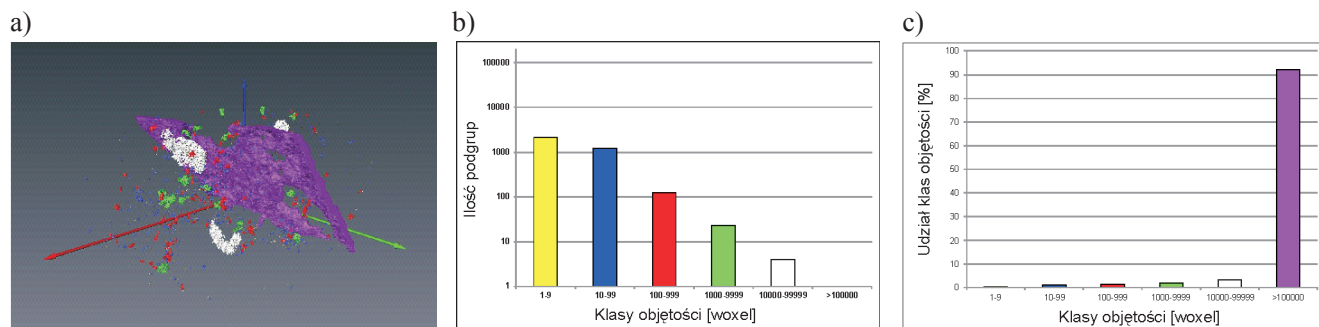
W analizowanym przykładzie za płaszczyznę szczeliny uznajemy obszar o podwyższonej porowatości, który w swych fragmentach może być wypełniony minerałami krystalizującymi, co potwierdzają również badania mikroskopowe (rysunek 9).

Próbka 9424 to wapień dolomityczny, reprezentujący



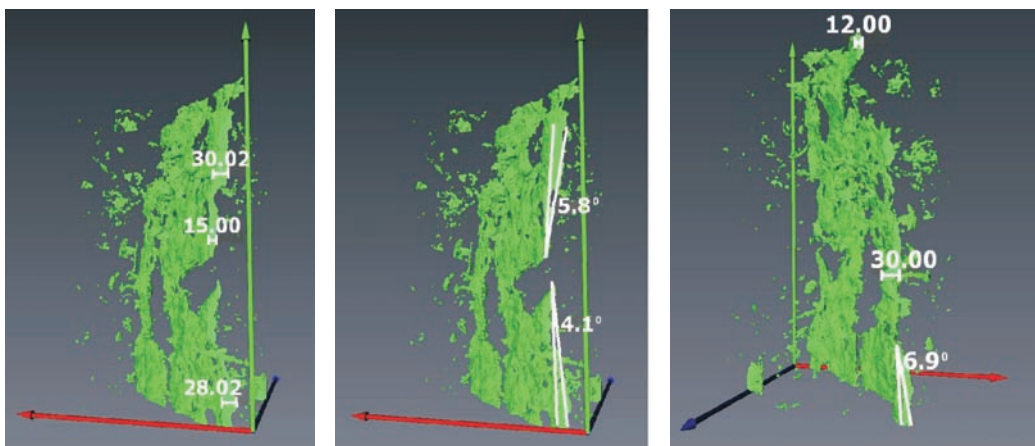
Rys. 7. Analiza mikrotomograficzna podpróbki 9423-1 (porowatość 2,4%)

a) przestrzenny rozkład porów z podziałem na klasy, b) ilościowy udział klas porów, c) objętościowy udział klas porów



Rys. 8. Analiza mikrotomograficzna podpróbki 9423-2 (porowatość 3,7%)

a) przestrzenny rozkład porów z podziałem na klasy, b) ilościowy udział klas porów, c) objętościowy udział klas porów



Rys. 9. Obraz mikrotomograficzny przekroju przez szczelinę próbki 9423

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

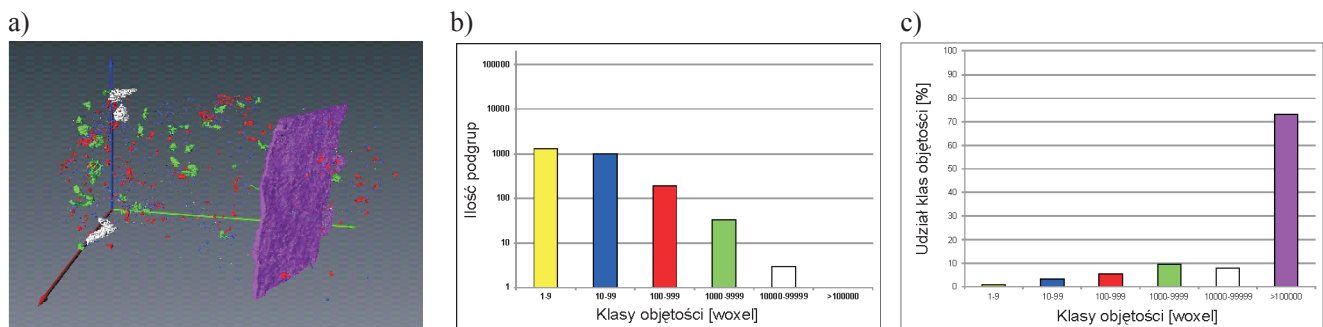
skąłę zdiagnozowaną. Jej porowatość całkowita, określona metodą micro-CT, jest mała i w obu podpróbkach porównywalna (0,9% i 0,6%).

W odróżnieniu od poprzedniej próbki, w próbce 9424 pory należące do niższych od VI klasy objętości zaczynają odgrywać istotną rolę w porowatości skały. W próbce tej jednak nadal występuje tylko jedna szczelina, biegnąca po całej przekątnej badanej objętości.

W przedstawionym elementarnym fragmencie wapie-

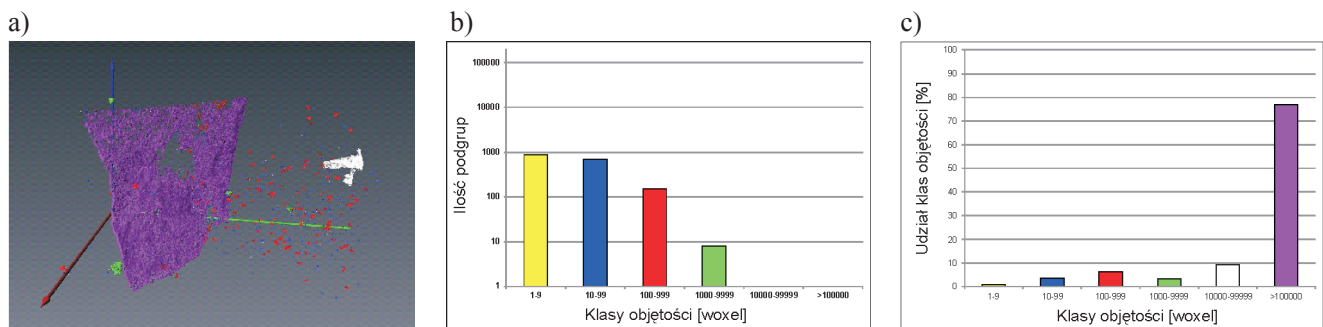
nia dolomitycznego (próbka 9424), w płaszczyźnie X–Y zarysowuje się obraz szczeliny, której długość wynosi 828,28  $\mu\text{m}$  (około 0,8 mm), a szerokość mieści się w zakresie od 6,00  $\mu\text{m}$  do 10,63  $\mu\text{m}$  (rysunek 12). Obecność tej szczeliny została potwierdzona badaniami mikroskopowymi.

W obydwu próbkach wapienia dolomitycznego można zauważyć obecność jednej szczeliny. Analiza numeryczna pokazuje jednak, że jej udział w porowatości jest mniejszy niż w przypadku próbek czystego wapienia (rysunki 4 i 5).



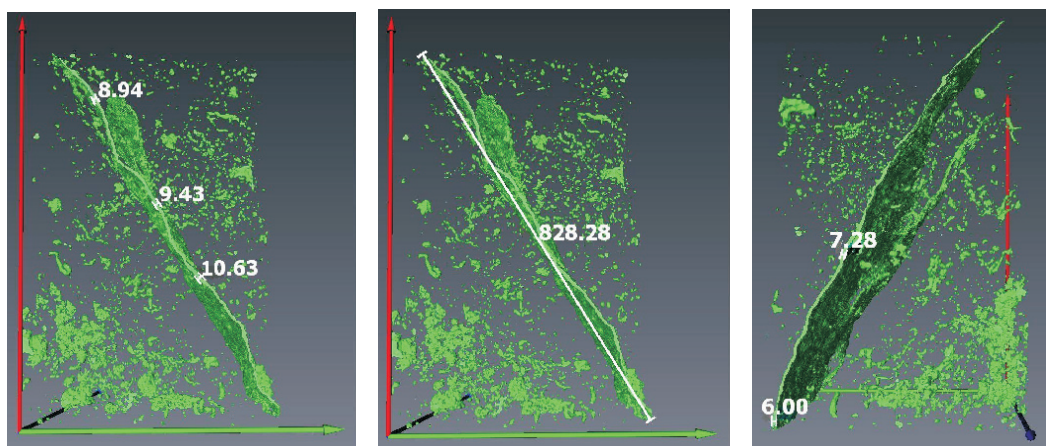
Rys. 10. Analiza mikrotomograficzna podpróbki 9424-1 (porowatość 0,9%)

a) przestrzenny rozkład porów z podziałem na klasy, b) ilościowy udział klas porów, c) objętościowy udział klas porów



Rys. 11. Analiza mikrotomograficzna podpróbki 9424-2 (porowatość 0,6%)

a) przestrzenny rozkład porów z podziałem na klasy, b) ilościowy udział klas porów, c) objętościowy udział klas porów



Rys. 12. Obraz mikrotomograficzny przekroju przez szczelinę próbki 9424

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

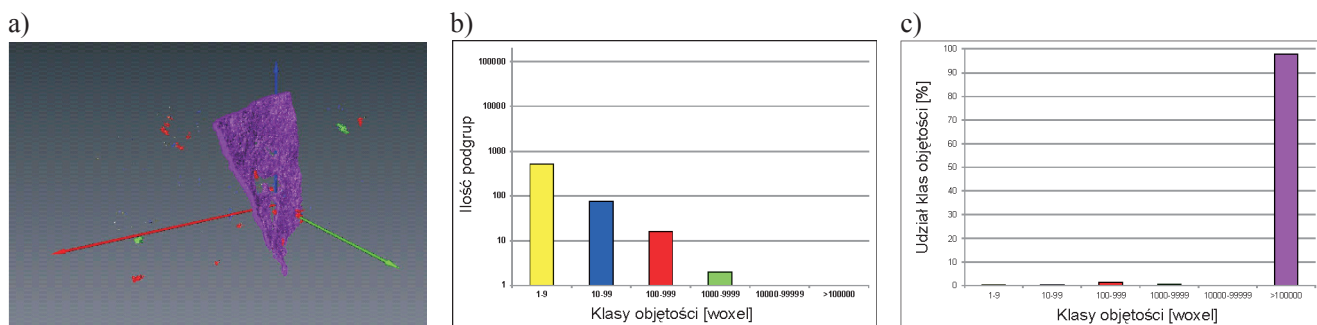
Dolomity

Na rysunkach 13 i 14 pokazano rozkład przestrzenny porów w próbce 9434 dolomitu.

Rysunek 13 pokazuje, że w pierwszej podpróbce (9434-1) praktycznie cała porowatość (ok. 98%) pochodzi od szczeliny obecnej w tej próbce. W przypadku podpróbki drugiej (9434-2 – rysunek 14) udział szczeliny w porowatości całkowitej jest znaczny, jednak zdecydowanie mniejszy niż w pod próbce 9434-1. Próbka 9434 charakteryzuje się anizotropią porowatości.

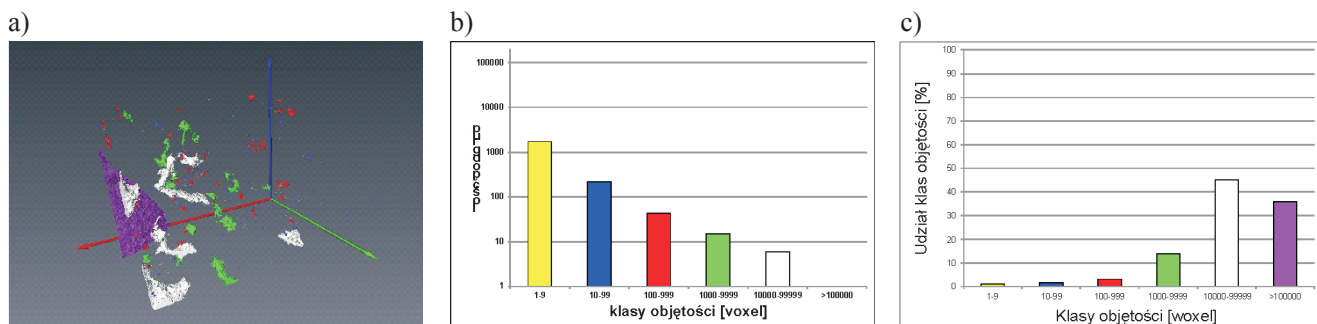
W trójwymiarowej przestrzeni obrazu tomograficznego widnieje jedna szczelina, o szerokiej płaszczyźnie. Szerokość jej zmienia się w zakresie od 13,89  $\mu\text{m}$  do 20,00  $\mu\text{m}$ , natomiast rozwartość całej szczeliny wynosi 1,77° (rysunek 15).

Analizę numeryczną struktury porowej próbki 8287 dolomitu przeprowadzono na dwóch pod próbkach, których trójwymiarowe obrazy mikrotomograficzne przedstawiają rysunki 16a i 17a.



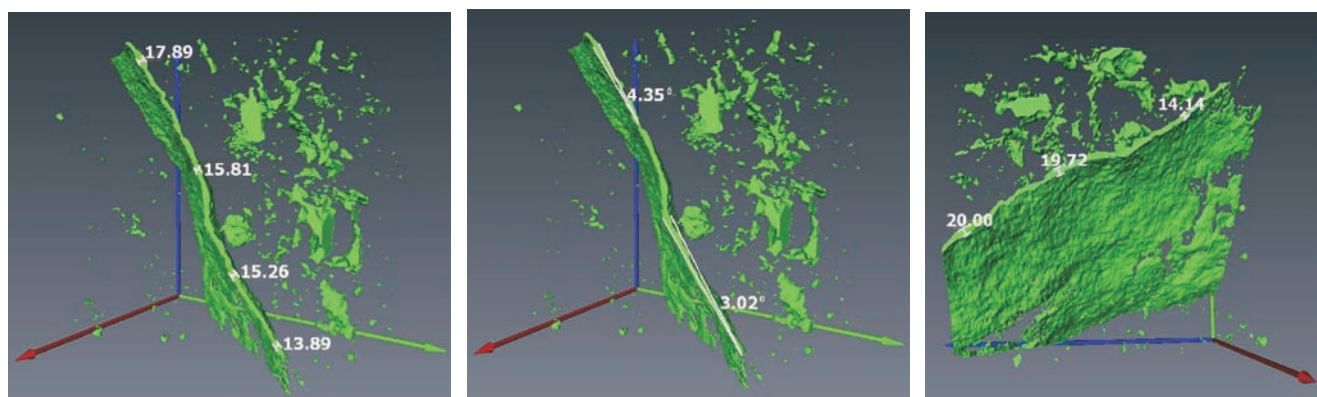
Rys. 13. Analiza mikrotomograficzna pod próbki 9434-1 (porowatość 1,2%)

a) przestrzenny rozkład porów z podziałem na klasy, b) ilościowy udział klas porów, c) objętościowy udział klas porów



Rys. 14. Analiza mikrotomograficzna pod próbki 9434-2 (porowatość 0,8%)

a) przestrzenny rozkład porów z podziałem na klasy, b) ilościowy udział klas porów, c) objętościowy udział klas porów

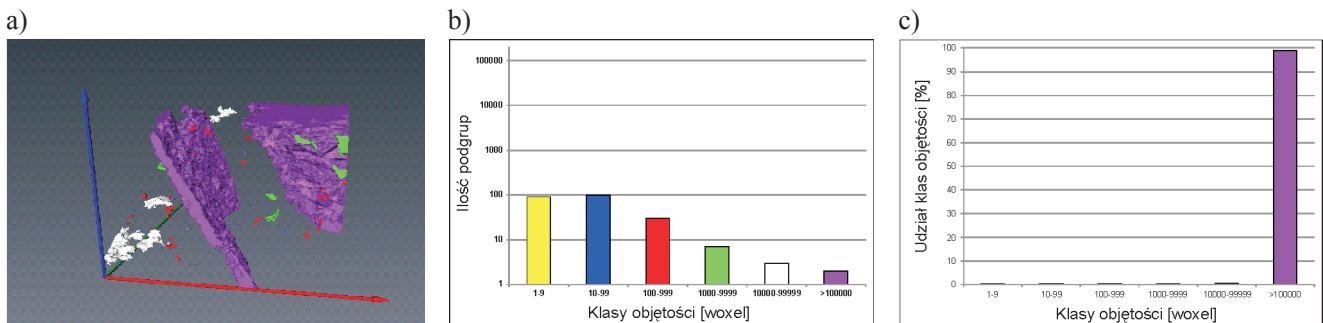


Rys. 15. Obraz mikrotomograficzny przekroju przez szczelinę próbki 9434

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

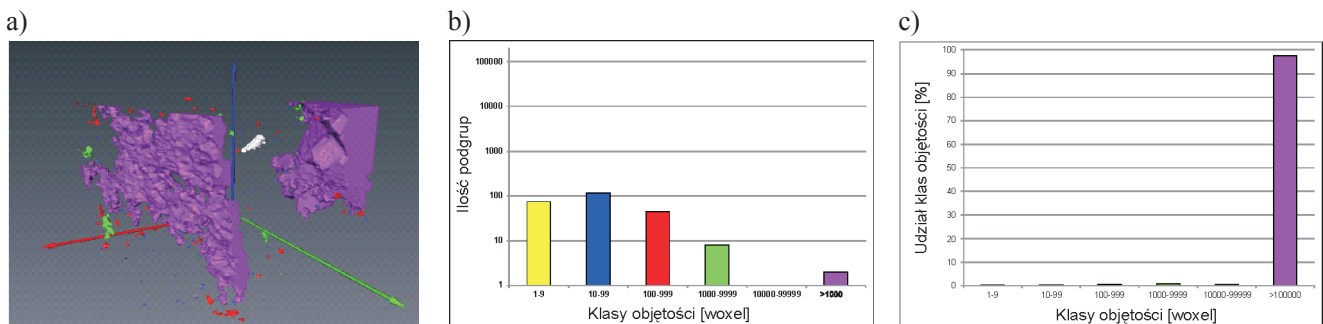
W odróżnieniu od wszystkich opisanych wcześniej próbek, w próbce 8287 występuje więcej niż jedna szczelina. Pomiedzy dwiema szczelinami znajduje się duża pustka, należąca do VI klasy porowatości. Pory

należące do niższych klas objętości praktycznie nie mają wkładu do całkowitej porowatości próbki. W obrębie próbki występuje znaczna anizotropia porowatości (rysunki 16 i 17).



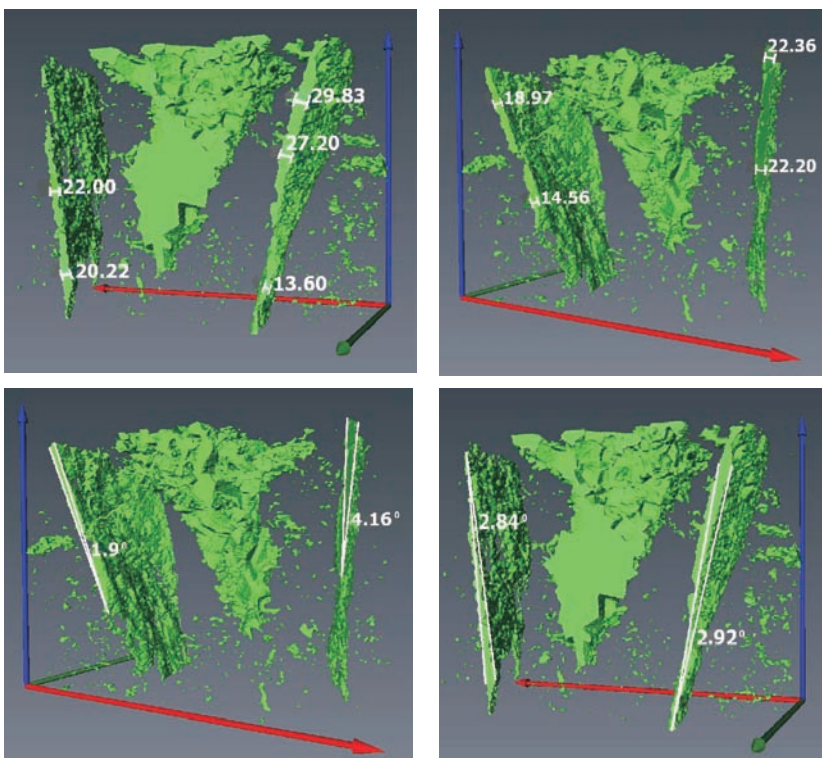
Rys. 16. Analiza mikrotomograficzna podpróbki 8287-1 (porowatość 17,8%)

a) przestrzenny rozkład porów z podziałem na klasy, b) ilościowy udział klas porów, c) objętościowy udział klas porów



Rys. 17. Analiza mikrotomograficzna podpróbki 8287-2 (porowatość 3,3%)

a) przestrzenny rozkład porów z podziałem na klasy, b) ilościowy udział klas porów, c) objętościowy udział klas porów



Rys. 18. Obraz mikrotomograficzny przekroju przez szczelinę próbki 8287  
oś X – kolor czerwony, oś Y – kolor zielony,  
oś Z – kolor niebieski

W wyniku badań mikrotomograficznych w próbce 8287 zaobserwowano występowanie dwóch szczelin (rysunek 18). Pomierzone szerokości tych szczelin są zmienne i mieszczą się w zakresie od 13,60  $\mu\text{m}$  do 29,83  $\mu\text{m}$ . Kąty rozwarcia analizowanych szczelin w jednej płaszczyźnie

wynoszą 2,84° i 2,92°, natomiast w drugiej – odpowiednio: 1,9° i 4,16°.

W odróżnieniu od próbki 9434, próbka dolomitu 8287 charakteryzuje się obecnością równomiernie rozłożonych porów klasy I–IV.

## Podsumowanie

Dynamiczny rozwój metod eksperymentalnych fizyki wypromował technikę mikrotomografii rentgenowskiej na metodę laboratoryjną o niespotykanych dotychczas możliwościach badawczych, w aspekcie badania wewnętrznej struktury porowej skał.

Z punktu widzenia aktualnych kierunków badań, istotne są dzisiaj metody obrazujące różne własności fizyczne powierzchni cienkich warstw i przestrzeni między nimi. Takie możliwości badawcze daje mikrotomografia, która z serii

2-wymiarowych projekcji próbek skalnych pozwala zrekonstruować 3-wymiarowy obraz wewnętrznej mikrostruktury próbki, z uwzględnieniem jej szczelinowatości i określeniem czynników wpływających na zmianę rozwartości szczelin.

Generalną zaletą mikro-CT – w porównaniu z metodą mikroskopową – jest możliwość obrazowania szczelin w przestrzeni trójwymiarowej i dokumentowania tych obrazów, ze szczególnym uwzględnieniem biegu szczelin w próbce i możliwości określania zmian ich rozwartości.

Artykuł nadesłano do Redakcji 04.12.2009 r. Przyjęto do druku 27.04.2010 r.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

## Literatura

- [1] Avizo 6.1 Documentation.
- [2] Dohnalik M., Zalewska J.: *Zastosowanie mikrotomografii rentgenowskiej do rozwiązywania zagadnień geologicznych i geofizycznych*. Prace INiG Nr 157, 1–93, Kraków 2009.
- [3] MAVI 1.3.1 Online Documentation.
- [4] Zalewska J., Dohnalik M., Poszytek A.: *Wizualizacja i analiza przestrzeni porowej piaskowców czerwonego spagowca metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej*. Prace INiG Nr 161, 1–83, Kraków 2009.
- [5] Zalewska J., Dohnalik M.: *Ilościowa ocena porowatości metodą mikrotomografii rentgenowskiej*. Nafta-Gaz Nr 11, 910–915, 2009.



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.



Mgr inż. Jadwiga ZALEWSKA – geolog, absolwentka AGH. Kierownik Zakładu Geofizyki Wiertniczej Instytutu Nafty i Gazu. Realizuje prace badawcze w zakresie laboratoryjnych pomiarów parametrów rdzeni i płuczek wiertniczych pod kątem ilościowej interpretacji profilowań geofizycznych. Autorka 110 publikacji.



Mgr Jan KACZMARCZYK – absolwent Wydziału Chemii Uniwersytetu Jagiellońskiego na specjalności Kataliza i chemia powierzchni ciała stałego. Pracuje w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej INiG. Zajmuje się badaniami metodą mikrotomografii rentgenowskiej, komputerowym przetwarzaniem i analizą obrazu oraz symulacjami numerycznymi.