

Wyniki badań testu wytrzymałościowego próbki węgla w świetle badań tomograficznych

Research results of triaxial geomechanical tests of a coal sample in the light of tomographic tests

Marek Dohnalik¹, Paulina Krakowska-Madejska², Edyta Puskarczyk², Iwona Jelonek³

¹ Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy w Krakowie

² AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

³ Uniwersytet Śląski w Katowicach

STRESZCZENIE: Celem niniejszej pracy było sprawdzenie możliwości wykorzystania rentgenowskiej tomografii komputerowej (CT) do obserwacji spękań w badanej próbce węgla przed i po teście geomechanicznym, przeprowadzonym w stanie trójosiowych naprężeń (TRX). W pracy przedstawiono zastosowanie dwóch specjalistycznych technik laboratoryjnych: rentgenowskiej tomografii komputerowej i geomechanicznego trójosiowego testu ściskania. Testy geomechaniczne przeprowadzono za pomocą zestawu pomiarowego TRX-070, GCTS (USA), rejestrując pełną charakterystykę naprężeniowo-odkształceniową. Podczas trójosiowych testów ściskania wykonano też innowacyjne równoczesne pomiary prędkości fal P i S. Próbkę analizowano w dwóch etapach, zdefiniowanych ze względu na stan próbki w obrazie CT: pomiar CT wykonany na nienaruszonej próbce węgla (etap 1) oraz otrzymany po teście zniszczeniowym (etap 2). W pierwszym etapie próbka została zeskanowana w celu odzwierciedlenia początkowego stanu struktury porowej wraz z układem mikropęknięć. Drugi etap reprezentuje próbkę po badaniu geomechanicznym. Dla każdego z etapów przeprowadzono szczegółową analizę struktury porowej. W wyniku proponowanego połączenia wymienionych metod w każdym etapie uzyskano obrazy struktury porów. Próbkę analizowano pod kątem liczby i kierunków propagacji pęknięć i zmian w strukturze porów. Interpretacja jakościowa i ilościowa opierała się na rejestracji zmiany liczby pustek, średnic pęknięć, kątów zapadania i porównaniu struktury porowej pomiędzy stanem początkowym próbki oraz po badaniu geomechanicznym. W 1 etapie (przed testem) największy obiekt (zidentyfikowany jako mikroszczelina) przyjmował objętość powyżej 16 mm³, po wystawieniu próbki na działanie naprężeń (po zniszczeniu próbki) największy zidentyfikowany obiekt charakteryzował się objętością około 15 razy większą (240 mm³). Zidentyfikowane w etapie 2 (po teście wytrzymałościowym) pory są wydłużone (wysokie wartości parametru Elongation), a także nie wykazują znaczącego spłaszczenia (Flatness). Według uzyskanych wyników próbka węgla była podatna na pękanie w określonych kierunkach. Kompleksowe badania wykazały zasadność zastosowania proponowanej metodologii do oceny zmian w strukturze próbki podczas testu wytrzymałościowego.

Słowa kluczowe: rentgenowska tomografia komputerowa, analiza obrazu, test wytrzymałościowy, prędkość fal P i S.

ABSTRACT: The study aimed to check the possibility of using computed tomography to observe fractures in coal samples before and after a triaxial compression test (TRX). The paper presents an innovative use of two specialized laboratory techniques: computed tomography and geomechanical triaxial compression test. Geomechanical tests were performed on a TRX-070, GCTS (USA) measuring triaxial system. A full stress-strain characteristic was recorded. Also, during the triaxial compression tests, the P and S wave velocities were measured and dynamic elastic moduli were determined. The results were compared. The sample was analyzed in two stages: CT measurement performed on raw coal sample (stage 1) and after the TRX test which destroyed the sample structure (stage 2). First, the sample was scanned reflecting the initial pores and microcracks system. The final stage represents the sample after the geomechanical test. A detailed pore structure analysis was performed for each of the stages. As a result of the proposed above-mentioned method, images of the pore structure were obtained after each step. The sample was analyzed for crack propagation and changes in the pore structure. The qualitative and quantitative interpretation was based on the determination of the number of voids, crack diameters, collapse angles, and comparison of the pore structure between the initial state of the sample and after the triaxial test. In the first stage (before the test), the largest object (identified as a microcrack) had a volume of approximately 16 mm³, after the sample was stress-tested (after the sample was destroyed), the largest identified object was about 15 times larger (240 mm³). It appeared that the coal sample was prone to fracturing in defined directions. Comprehensive research has demonstrated the legitimacy of using the proposed methodology to evaluate changes in the sample structure during the triaxial test.

Key words: computed tomography, image analysis, geomechanical test, P-wave and S-wave velocity.

Autor do korespondencji: M. Dohnalik, e-mail: marek.dohnalik@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 20.02.2020 r. Zatwierdzono do druku: 14.01.2021 r.

Wstęp

Połączenie wyników różnorodnych badań laboratoryjnych na próbkach skalnych jest dobrym sposobem otrzymania oceny parametrów fizycznych, tj. zbiornikowych, sprężystych czy wytrzymałościowych. W artykule przedstawiono metodykę badań i analizę wyników na próbce węgla. W skład badań laboratoryjnych wchodziły: rentgenowska tomografia komputerowa i test geomechaniczny w stanie trójosiowych naprężeń. Rentgenowska tomografia komputerowa (CT) została wykonana dwukrotnie – przed i po przeprowadzeniu testu wytrzymałościowego.

Celem pracy jest sprawdzenie możliwości wykorzystania tomografii komputerowej do obserwacji szczelin w próbkach skał oraz obserwacja zmian struktury porowej przed i po teście wytrzymałościowym. Efektem pracy jest połączenie informacji o wpływie parametrów badań wytrzymałościowych na zmiany w strukturze skał.

W artykule przedstawiono wyniki testu wytrzymałościowego przeprowadzonego w komorze ciśnieniowej w trójosiowym stanie naprężeń z pełną rejestracją charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej, wraz z równoczesnym pomiarem prędkości fal podłużnej i poprzecznej.

Obraz tomograficzny próbki poddanej badaniom wytrzymałościowym został przeanalizowany pod kątem oceny wpływu określonego układu naprężeń na strukturę próbki. Porowatość całkowita z obrazów tomograficznych, jak i parametry geometryczne przestrzeni porowej (Krakowska et al., 2018a) dostarczyły odpowiedzi o zmianie parametrów przestrzeni porowej w wyniku działania przyłożonych na próbkę naprężeń. Zestawiono także liczbę obiektów: porów i mikroszczelin w danej klasie objętości. Parametryzacja elementów przestrzeni porowej, możliwa dzięki badaniom CT, pozwala uzyskać szczegółowe informacje na temat jej zdolności gromadzenia płynów złożowych, a także dotyczące ich migracji (Jing et al., 2016). Połączenie wyników CT i testu geomechanicznego może wspomóc planowanie procesu szczelinowania o dodatkowe parametry, tj. wytrzymałość skały na ściskanie, moduły sprężyste, zmianę wielkości parametrów geometrycznych przestrzeni porowej (Nie et al., 2014; Mathews et al., 2017; Nazarova et al., 2017).

Materiał i metody

Badania laboratoryjne na próbce węgla obejmowały rentgenowską tomografię komputerową i test geomechaniczny przeprowadzony w stanie trójosiowych naprężeń.

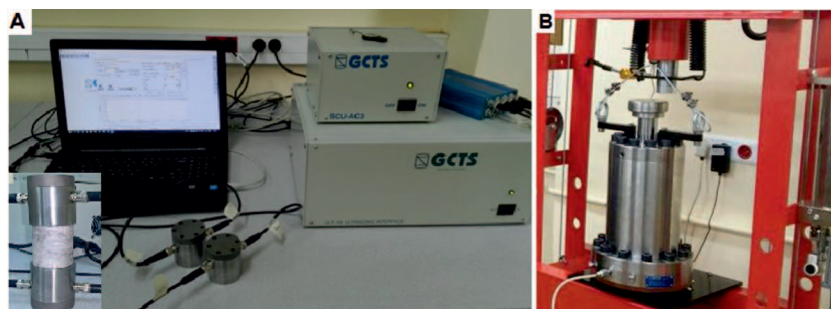
Badania zostały podzielone na dwa etapy ze względu na stan próbki w obrazie CT:

- etap 1: stan wejściowy, obejmował badania rentgenowskiej tomografii komputerowej próbki węgla;
- etap 2: stan pozniszczeniowy, test geomechaniczny w trójosiowym stanie naprężeń, rentgenowska tomografia komputerowa próbki węgla po przeprowadzeniu testu wytrzymałościowego (pomiar CT wykonany na zorientowanej próbce węgla, umieszczonej w folii termokurczliwej).

Test geomechaniczny

Do badań parametrów sprężystych w trakcie trwania testu wytrzymałościowego wykorzystano zestaw P&S Ultrasonic Velocity System ULT-100 firmy GCTS (rys. 1A), będący na wyposażeniu Laboratorium Petrofizyki Katedry Geofizyki WGGiOŚ AGH w Krakowie. Efektem pomiarów są pełne obrazy falowe dla fal P i S oraz dynamiczne moduły sprężyste. Zestaw pomiarowy ULT-100 został połączony z komorą ciśnieniową, dzięki czemu rejestracja prędkości fal sprężystych i dynamicznych modułów sprężystości może odbywać się równocześnie z testami wytrzymałościowymi w warunkach symulowanego ciśnienia złożowego i temperatury. Pomiar prędkości fal P i S oraz dynamicznych modułów sprężystości odbywa się automatycznie co 30 s – wewnątrz komory, podczas testu wytrzymałościowego umieszcza się dodatkowe czujniki, rejestrujące pełne obrazy falowe.

Testy wytrzymałościowe wykonano z wykorzystaniem komory ciśnieniowej High Pressure Triaxial Cell HTRX-070 firmy GCTS z USA (rys. 1B), umożliwiającej pomiar pełnej charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej w warunkach jedno- i trójosiowego stanu naprężeń wraz z równoczesną rejestracją prędkości fal P i S. Maksymalne wartości ciśnienia okólnego oraz obciążenia osiowego możliwe do zaaplikowania wynoszą odpowiednio 70 MPa i 1500 kN.



Rys. 1. Zestaw Ultrasonic Velocity System ULT-100 firmy GCTS (USA) do pomiarów parametrów sprężystych (A) oraz zestaw do testów wytrzymałościowych High Pressure Triaxial Cell HTRX-070 tej samej firmy (B)

Fig. 1. Ultrasonic Velocity System ULT-100, GCTS, USA for the measurement of elastic parameters (A) and High Pressure Triaxial Cell HTRX-070, GCTS, USA (B) for geomechanical tests

Pomiary przeprowadzono dla rdzenia o średnicy 2,5 cm oraz długości 5 cm.

W pracy zaprezentowano wyniki testu trójosiowego ściskania, polegającego na zadaniu założonego ciśnienia okólnego (zależnego od głębokości poboru próbki), a następnie na stopniowym obciążaniu osiowym próbki aż do momentu zniszczenia. Zastosowana metodyka pomiarowa i interpretacyjna była zgodna z normami ASTM D4543, ASTM D7012 oraz zaleceniami International Society for Rock Mechanics (ISRM, 2007). Pomiary sterowane były stałą prędkością obciążania osiowego.

Badania tomograficzne

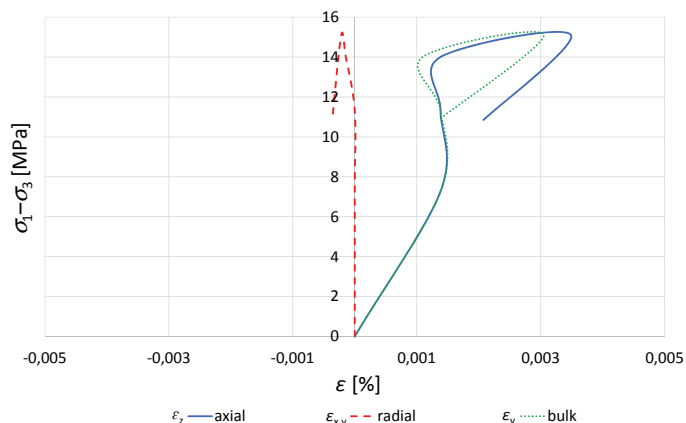
Pomiary CT zostały wykonane w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym w Krakowie z użyciem rentgenowskiego tomografu komputerowego Benchtop CT 160Xi firmy Nikon. W celu otrzymania obrazów o zbliżonych wartościach szarości w obydwu pomiarach zastosowano takie same parametry urządzenia, które wynosiły: 130 kV i 204 μ A. Po rekonstrukcji zarejestrowanych projekcji otrzymano obrazy 3D, dla których izotropowy rozmiar woksele wynosi $0,024 \times 0,024 \times 0,024$ mm. Dla surowego obrazu wyliczono histogram wartości szarości w programie ImageJ, a następnie obraz zbinaryzowano w oprogramowaniu Avizo (Dohnalik et al., 2016) tak, aby pozostały na nim dwie warstwy reprezentujące przestrzeń porową i matrycę próbki węgla. W dalszym kroku dokonano szczegółowej analizy obrazów tomograficznych, wykorzystując w tym celu oprogramowanie poROSE (poROUs materials examination SoftwarE) (Krakowska et al., 2018b; Madejski et al., 2018).

Wyniki badań

Analiza wyników badań geomechanicznych

Dla próbki węgla sporządzono wykres przedstawiający charakterystykę naprężeniowo-odkształceniową (rys. 2). Próbka charakteryzowała się liniowością w zakresie naprężeń różnicowych do 7 MPa. Na rysunku 2 można zauważyć właściwie od początku etap sprężystych odkształceń szkieletu w postaci liniowego przebiegu charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych. W kolejnej fazie (powyżej 7 MPa) krzywe przyjmują kształt nieliniowy, nasila się propagacja szczelin. Maksymalny wzrost odkształceń objętościowych wyznacza próg makrodylatacji (tutaj osiągnięty dla 9 MPa), powyżej którego następuje niestabilny rozwój spękań, doprowadzający do zniszczenia próbki. Dodatkowo w przedziale 9–12 MPa zaobserwowano wzrost naprężeń, przy jednoczesnym braku

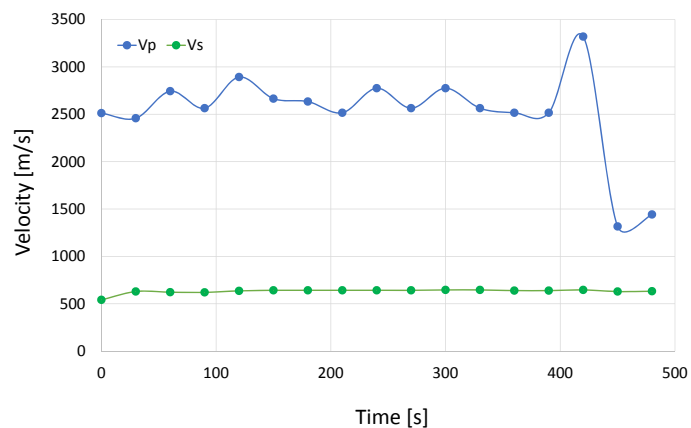
wzrostu odkształceń. Powyżej 13,7 MPa obserwuje się gwałtowny wzrost odkształceń, po którym następuje pęknięcie próbki. W trakcie testu próbka nie uległa dezintegracji, a jedynie spękała.



Rys. 2. Charakterystyka naprężeniowo-odkształceniowa zarejestrowana dla próbki. Symbole: $\sigma_1 - \sigma_3$ – naprężenie różnicowe, ϵ_z – odkształcenie osiowe, ϵ_{xy} – odkształcenie radialne, ϵ_v – odkształcenie objętościowe

Fig. 2. Stress-strain characteristic registered for sample. Symbols: $\sigma_1 - \sigma_3$ – deviator stress, ϵ_z – axial strain, ϵ_{xy} – radial strain, ϵ_v – volumetric strain

W trakcie testu wytrzymałościowego mierzono równocześnie prędkości fal podłużnej P i poprzecznej S w kierunku pionowym, wzdłuż osi próbki (w tym samym kierunku obciążano próbkę osiowo). Przedstawiono wykresy zmian prędkości fal P i S w trakcie trwania testu wytrzymałościowego (rys. 3). Zaobserwowano fluktuacje prędkości fali podłużnej podczas ściskania oraz niewielki, stały przyrost prędkości fali poprzecznej. V_p rośnie w zakresie od 2458 m/s do 3320 m/s – osiągniętej w momencie maksymalnego naprężenia. Po zniszczeniu próbki prędkość V_p spadła, natomiast V_s



Rys. 3. Zmiany prędkości fal podłużnej i poprzecznej rejestrowane podczas testu wytrzymałościowego

Fig. 3. P and S wave velocity changes during the geomechanical test

nie wykazała znaczącej zmiany. Prędkość fali poprzecznej rosła od 541 m/s do 648 m/s ze średnią 637 m/s podczas trwania testu. Zmiany prędkości fali podłużnej w trakcie kolejnych etapów testu wytrzymałościowego świadczą o dużym wpływie obecności porów i szczelin na wartość tego parametru, tym bardziej że V_p mierzona jest zgodnie z kierunkiem przyłożonego naprężenia osiowego. Prędkość fali poprzecznej nie wykazuje dużych zmian związanych z zamykaniem porów i mikroszczelin czy tworzeniem nowych pęknięć w trakcie testu.

Wyniki badań tomograficznych

Rentgenowska tomografia komputerowa dostarczyła informacji na temat wykształcenia przestrzeni porowej analizowanej próbki węgla, a także wpływu wykonanego testu geomechanicznego w trójosiowym stanie naprężeń na parametry geometryczne przestrzeni porowej. Porowatość całkowita z CT próbki węgla przed zniszczeniem wynosiła 3,99%. Po wykonaniu testu wytrzymałościowego próbka węgla powiększyła porowatość całkowitą do 7,68%. Wzrost porowatości związany jest z powstaniem nowych szczelin w strukturze próbki; próbka nie rozpadła się po teście geomechanicznym.

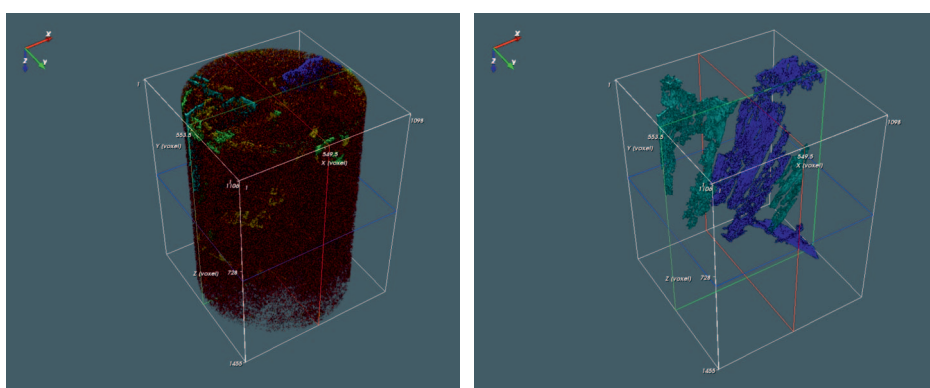
Rysunki 4 i 5 ilustrują klasyfikację objętościową obiektów (porów, mikroszczelin) w próbce węgla, odpowiednio z etapu 1 i 2. Na rysunku 5 zaobserwować można duży obiekt, zaznaczony na niebiesko, który przechodzi przez prawie całą próbkę. Jest to szczelina powstała na skutek działających naprężeń.

Tabela 1 przedstawia klasyfikację objętościową obiektów przestrzeni porowej analizowanej próbki. Przestrzeń porowa zwiększyła liczbę obiektów po przeprowadzeniu testu wytrzymałościowego z 566 045 do 652 481 obiektów. Największa liczba obiektów występuje w pierwszej klasie objętości (1–99 wokseli) i stanowi w obu przypadkach ponad 98% udziału liczby obiektów w budowaniu przestrzeni porowej. Naprężenia wywołały znaczące podwyższenie liczby obiektów w drugiej i trzeciej klasie objętości. Zaobserwowano zmniejszenie liczby obiektów jedynie w piątej i szóstej

klasie objętości, co mogło być spowodowane połączeniem się mniejszych obiektów w jeden większy obiekt.

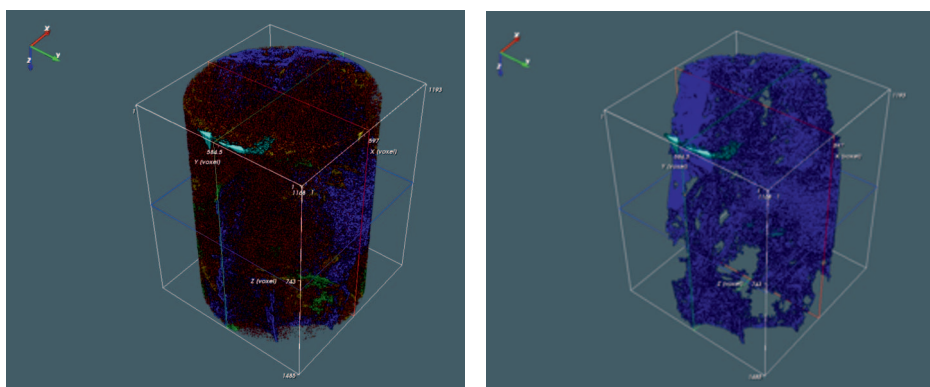
W kolejnym kroku analizy dokonano parametryzacji przestrzeni porowej próbki węgla poprzez obliczenie następujących parametrów:

- *Volume* – objętość obiektu;
- *Surface Area* – pole powierzchni obiektu;
- *Equivalent Diameter* – średnica ekwiwalentna obiektu;
- *Thickness Max, Thickness Mean, Thickness Std* – wartość maksymalna, średnia i odchylenie standardowe grubości obiektu;
- *Elongation* – wydłużenie obiektu;
- *Flatness* – spłaszczenie obiektu;



Rys. 4. Próbkę węgla przed testem wytrzymałościowym, klasyfikacja objętościowa obiektów, etap 1. Kolory: czerwony: 1–99 wokseli, pomarańczowy: 100–999 wokseli, żółty: 1000–9999 wokseli, zielony: 10 000–99 999 wokseli, niebieski: 100 000–999 999 wokseli, ciemnoniebieski: powyżej 1 000 000 wokseli. Rysunek po lewej stronie obrazuje wszystkie obiekty w próbce, rysunek po prawej stronie – jedynie obiekty powyżej 1 000 000 wokseli objętości

Fig. 4. Sample before the triaxial compression test, pore size classification, stage 1. Colors: red: 1–99 voxels, orange: 100–999 voxels, yellow: 1000–9999 voxels, green: 10,000–99999 voxels, blue: 100000–999999 voxels, dark blue: above 1000000 voxels. The diagram on the left shows all objects in the sample, the diagram on the right shows only objects above 1000000 voxels in volume



Rys. 5. Próbkę węgla po teście wytrzymałościowym, klasyfikacja objętościowa obiektów, etap 2. Kod kolorów jak na rys. 4. Rysunek po lewej stronie obrazuje wszystkie obiekty w próbce, rysunek po prawej stronie – jedynie obiekty powyżej 1 000 000 wokseli objętości

Fig. 5. Sample after the triaxial compression test, pore size classification, stage 2. Colors legend as in Fig. 4. The diagram on the left shows all objects in the sample, the diagram on the right shows only objects above 1000000 voxels in volume

- *Feret Max* – maksymalna średnica Fereta;
- *Feret Breadth* – rozpiętość obiektu;
- *Feret Shape* – kształt Fereta.

Parametry Fereta zostały policzone dla rzutu obiektów na płaszczyznę ustawioną pod kątem 30° do płaszczyzny XY. W ten sposób próbowano zidentyfikować rzeczywiste wymiary Fereta obiektów, które wykazywały wydłużenie w danym kierunku. Średnica Fereta została policzona dla kąta 30°, gdyż większość zidentyfikowanych obiektów była zorientowana pod takim kątem do płaszczyzny XY. Stąd najlepiej można było odwzorować średnicę.

W tabeli 2 zestawiono wyniki obliczeń parametrów geometrycznych przestrzeni porowej próbki węgla dla dwóch etapów. Parametr *Volume* (wartość maksymalna) pozwolił zidentyfikować największy obiekt w próbce przed i po teście

wytrzymałościowym. W 1. etapie największy obiekt (zidentyfikowany jako mikroszczelina) przyjmował objętość powyżej 1 mln wokseli, a po wystawieniu próbki na działanie naprężeń (po zniszczeniu próbki) największy zidentyfikowany obiekt charakteryzował się objętością około 15 razy większą. Mediana objętości obiektów była podobna, co wskazuje na w miarę proporcjonalne zwiększenie liczby obiektów w różnych klasach objętości. Powstałe obiekty wykazują znaczną zmienność w objętości, gdyż znacząco wzrosło odchylenie standardowe objętości etapu 2. Pory są wydłużone (wysokie wartości parametru *Elongation*), a także nie wykazują znaczącego spłaszczenia (*Flatness*) w etapie 1 i 2. Średnio średnica ekwiwalentna (*Equivalent Diameter*) i grubość (*Thickness Mean, Max*) zmniejszyły wartość, jednakże wartości maksymalne wskazują na powiększenie się średnicy obiektów. Pole powierzchni

Tabela 1. Klasyfikacja objętościowa obiektów przestrzeni porowej próbki węgla

Table 1. Object size classification with regard to volume

Etap	Klasa objętości [woksel]	1–99	100–999	1000–9999	10 000–99 999	100 000–999 999	>1 000 000	SUMA
	[mm ³]	$1,38 \cdot 10^{-5} - 1,37 \cdot 10^{-3}$	$1,38 \cdot 10^{-3} - 1,37 \cdot 10^{-2}$	$1,38 \cdot 10^{-2} - 1,37 \cdot 10^{-1}$	$1,38 \cdot 10^{-1} - 1,37$	1,38 – 13,8	>13,8	
	Kolor							
Etap 1	%	50,0	8,1	3,3	3,1	7,6	18,0	100
	#	560 042	5789	190	19	3	2	566 045
Etap 2	%	28,3	6,4	3,0	3,0	1,0	58,4	100
	#	642 963	9070	409	36	2	1	652 481

Oznaczenia: % – udział procentowy danej klasy w budowaniu przestrzeni porowej, # – liczba obiektów w danej klasie objętości

Tabela 2. Parametry geometryczne przestrzeni porowej

Table 2. Geometric parameters of the pore space

Etap	Parametr	Volume	Surface Area	Equivalent Diameter	Thickness Max	Thickness Mean	Thickness Std	Elongation	Flatness	Feret Max	Feret Breadth	Feret Shape
	Jednostka	[mm ³]	[mm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[mm]	[-]	[-]
Etap 1	Min.	0,00003	0,001	0,037	0,000	0,048	0,000	0,50	0,00	0,05	1,00	1,02
	Maks.	16,46	636,421	3,156	1,715	1,020	0,615	1,00	1,00	31,95	628,38	10,43
	Śr.	0,00035	0,013	0,071	991,3	1054,9	0,001	0,84	0,47	0,12	3,65	2,20
	Od.St.	0,03344	1,011	0,021	0,008	0,004	0,004	0,09	0,21	0,09	2,17	0,75
	Med.	0,00015	0,006	0,066	0,048	0,048	0,000	0,85	0,46	0,10	3,23	2,00
Etap 2	Min.	0,00003	0,001	0,037	0,000	0,048	0,000	0,50	0,00	0,05	1,00	1,02
	Maks.	240,11	8641,950	7,711	1,548	1,046	0,453	1,00	1,00	44,43	1442,94	9,06
	Śr.	0,00066	0,025	0,070	0,050	0,049	0,001	0,84	0,47	0,12	3,74	2,04
	Od.St.	0,29805	10,715	0,024	0,007	0,003	0,003	0,09	0,20	0,10	2,90	0,58
	Med.	0,00014	0,006	0,064	0,048	0,048	0,000	0,86	0,46	0,10	3,23	1,87

Symbole: Min. – wartość minimalna, Maks. – wartość maksymalna, Śr. – wartość średnia, Od.St. – odchylenie standardowe wartości średniej, Med. – mediana

obiektów uległo widocznemu zwiększeniu, co wskazuje na skomplikowanie kształtu obiektów, np. nierówności, skrócenie.

Podsumowanie i wnioski końcowe

W pracy przedstawiono metodę połączenia wyników pomiarów dwóch specjalistycznych technik laboratoryjnych: tomografii komputerowej i geomechanicznych badań wytrzymałościowych. Próbka została przeanalizowana w 2 etapach – przeprowadzono pomiar CT na wyciętej próbce węgla (etap 1) oraz po badaniach wytrzymałościowych polegających na wykonaniu testu w trójosiowym stanie naprężeń, doprowadzającego do zniszczenia próbki (etap 2). W wyniku proponowanego połączenia opisanych metod otrzymano obrazy struktury porowej próbki węgla przed i po badaniu wytrzymałościowym. Przebadano zmiany struktury porowej próbki i tworzenia się nowych szczelin. Zaobserwowano istotne zmiany struktury próbki podczas zniszczeniowego etapu badań, potwierdzając preferencje określonych kierunków tworzenia się spękań.

Badana próbka węgla cechowała się liniowością charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej w zakresie naprężeń różnicowych do 7 MPa. Maksymalny wzrost odkształceń objętościowych został osiągnięty dla 9 MPa (próg makrodeformacji). Zaobserwowano fluktuacje prędkości fali podłużnej podczas ściskania oraz niewielki, stały przyrost prędkości fali poprzecznej. Prędkość fali podłużnej wzrastała w zakresie od 2458 m/s do 3320 m/s – osiągniętej w momencie maksymalnego naprężenia. Prędkość fali poprzecznej wzrastała w niewielkim zakresie – od 541 m/s do 648 m/s podczas trwania testu wytrzymałościowego. Przestrzeń porowa zwiększyła liczbę obiektów po przeprowadzeniu testu wytrzymałościowego z 566 045 do 652 481 obiektów. W 1. etapie (przed testem) największy obiekt (zidentyfikowany jako mikroszczelina) przyjmował objętość powyżej 16 mm³, natomiast po wystawieniu próbki na działanie naprężeń (po zniszczeniu próbki) największy zidentyfikowany obiekt charakteryzował się objętością około 15 razy większą (240 mm³). Zidentyfikowane w etapie 2 (po teście wytrzymałościowym) pory są wydłużone (wysokie wartości parametru *Elongation*), a także nie wykazują znaczącego spłaszczenia (*Flatness*).

Bazując na otrzymanych danych, stwierdzono, że proponowany zestaw badań może być stosowany w celu zwiększenia efektywności planowania zabiegów stymulujących, gdyż analiza charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej i rozpoznanie geomechanicznych własności skały w zestawieniu z obrazem struktury wewnętrznej próbki może pomóc w doborze właściwej metodyki stymulacji wydobywania węglowodorów.

Badania warto przeprowadzić na większej liczbie próbek z uwzględnieniem wpływu składu macerałowego na właściwości geomechaniczne próbek węgla.

Uwagi

Program poROSE został sfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju z programu Lider VI, projekt pt. *Nowatorska metodyka interpretacji niekonwencjonalnych złóż ropy i gazu z wykorzystaniem wyników rentgenowskiej tomografii komputerowej* (umowa LIDER/319/L-6/14/NCBR/2015).

Pomiary geomechaniczne oraz część analizy obrazów tomograficznych zostały sfinansowane w ramach subwencji przyznanej dla WGGiOŚ, AGH, nr 16.16.140.315.

Pomiary tomograficzne oraz część analizy obrazów tomograficznych zostały sfinansowane w ramach pracy statutowej INiG – PIB. Artykuł powstał na podstawie pracy badawczej pt. *Obrazowanie struktury skał metodą tomografii komputerowej w celu określenia przebiegu szczelin przed i po wykonaniu testów wytrzymałościowych* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0054/SW/2019, nr archiwalny: SW-4101-0044/2019.

Literatura

- Dohnalik M., Drabik K., Wolański K., Zarudzki W., Kiersnowski H., 2016. Wykorzystanie tomografii komputerowej w badaniu rdzeni skał. *Nafta-Gaz*, 12: 1035–1042. DOI: 10.18668/NG.2016.12.04.
- Jing Y., Armstrong R.T., Ramandi H.L., Mostaghimi P., 2016. Coal cleat reconstruction using micro-computed tomography imaging. *Fuel*, 181: 286–299. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.04.127.
- Krakowska P., Puskarczyk E., Habrat M., Madejski P., Jędrzychowski M., 2018a. Parametry geometryczne przestrzeni porowej niskoporowatych piaskowców kambryjskich wyznaczone na podstawie wyników badań laboratoryjnych na próbkach z rdzeni wiertniczych. *Nafta-Gaz*, 11: 783–788. DOI: 10.18668/NG.2018.11.01.
- Krakowska P., Puskarczyk E., Jędrzychowski M., Habrat M., Madejski P., Dohnalik M., 2018b. Innovative characterization of tight sandstones from Paleozoic basins in Poland using X-ray computed tomography supported by nuclear magnetic resonance and mercury porosimetry. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 166: 389–405. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.03.052.
- Madejski P., Krakowska P., Habrat M., Puskarczyk E., Jędrzychowski M., 2018. Comprehensive Approach for Porous Materials Analysis Using a Dedicated Preprocessing Tool for Mass and Heat Transfer Modeling. *Journal of Thermal Science*, 27: 479–486. DOI: 10.1007/s11630-018-1043-y.
- Mathews J.P., Campbell Q.P., Xu H., Halleck P.A., 2017. Review of the application of X-ray computed tomography to the study of Coal. *Fuel*, 209: 10–24. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.07.079.
- Nazarova L.A., Zakharov V.N., Shkuratnik V.L., Nazarov L.A., Protasov M.I., Nikolenko P.V., 2017. Use of Tomography in Stress-Strain Analysis of Coal-Rock Mass by Solving Boundary Inverse Problems. *Procedia Engineering*, 191: 1048–1055. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.278.
- Nie B., He X., Li X., Chen W., Hu S., 2014. Meso-structures evolution rules of coal fracture with the computerized tomography scanning method. *Engineering Failure Analysis*, 41: 81–88. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.10.007.

Akty prawne i dokumenty normatywne

ASTM D4543-01 Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances.

ASTM D7012-14e1 Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures.

ISRM, 2007. Suggested Method for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression. [W:] Ulusay R., Hudson J.A. (eds.). The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization Testing and Monitoring: 1974–2006.



Dr inż. Marek DOHNALIK
Adiunkt, Kierownik Zakładu Geofizyki Wiertniczej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: marek.dohnalik@inig.pl



Dr inż. Paulina KRAKOWSKA-MADEJSKA
Adiunkt na Wydziale Geologii, Geofizyki
i Ochrony Środowiska
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica
w Krakowie
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
E-mail: krakow@agh.edu.pl



Dr inż. Edyta PUSKARCZYK
Adiunkt na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony
Środowiska
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica
al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
E-mail: puskar@agh.edu.pl



Dr hab. Iwona JELONEK, prof. Uczelni
Uniwersytet Śląski w Katowicach
Instytut Nauk o Ziemi
ul. Będzińska 60
41-200 Sosnowiec
E-mail: iwona.jelonek@us.edu.pl

OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU GEOFIZYKI WIERTNICZEJ

- badania tomograficzne skał:
 - » trójwymiarowa wizualizacja i analiza wewnętrznej struktury przestrzeni porowej skał metodą mikrotomografii rentgenowskiej (micro-CT),
 - » tomografia metrowych odcinków skał, profilowanie zmian parametrów petrofizycznych rdzenia (porowatość, gęstość objętościowa);
- badania metodą jądrowego rezonansu magnetycznego:
 - » określanie rozkładu nasycenia wodą przestrzeni porowej próbek,
 - » generacja map T1-T2, szacowanie nasycenia wodą/węglowodorami,
 - » identyfikacja obecności substancji organicznej TOC;
 - » oznaczanie jakościowego i ilościowego składu mineralnego skał oraz wydzielonej frakcji ilastej na podstawie analizy rentgenowskiej;
- wyznaczanie zawartości naturalnych pierwiastków promieniotwórczych: uranu, toru i potasu w skałach, płuczkach wiertniczych i materiałach budowlanych;
- ocena elektrycznych parametrów skał (wskaźnika struktury porowej i zwilżalności);
- badanie przewodności cieplnej skał;
- interpretacja profilowań geofizyki wiertniczej w zakresie określenia litologii i parametrów zbiornikowych skał oraz ocena stanu zacementowania rur okładzinowych w otworach;
- badania serwisowe:
 - » pomiary składu chemicznego skał metodą fluorescencji rentgenowskiej XRF wykonywane w celu oceny składu mineralnego oraz analiz chemostratygraficznych,
 - » spektrometryczne pomiary gamma na rdzeniu wiertniczym: ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th , total gamma przy wykorzystaniu mobilnego urządzenia „Gamma Logger”.



Kierownik: dr inż. Marek Dohnalik Adres: ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków
Telefon: 12 650 67 70 Faks: 12 653 16 65 E-mail: marek.dohnalik@inig.pl



INSTYTUT NAFTY I GAZU
– Państwowy Instytut Badawczy