

Grzegorz Leśniak

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Analiza rozwartości mikroszczelin w węglach

Na podstawie wykonanych analiz mikroszczelinowości, przepuszczalności i porowatości wykonano analizę rozwartości mikroszczelin przy określonym ciśnieniu nadkładu. Wyliczono porowatość szczelinową oraz porowatość matrycy. Przepuszczalność analizowanych próbek węgla określono jako szczelinową i wyznaczono trzy charakterystyczne przebiegi zamykania się szczelin pod wpływem ciśnienia nadkładu.

Słowa kluczowe: przepuszczalność, mikroszczeliny, rozwartość, węgiel.

Estimation of the width of microfracture in coals

On the basis of performed analyzes of microfractures, permeabilities and porosities, the analysis of the microfracture width was done at a given overburden pressure. Fracture and matrix porosity were calculated. The permeability of the analyzed coal samples was determined as a fracture, and three characteristic courses of closing the fracture under the influence of overburden pressure were determined.

Key words: permeability, microfracture, width of microfracture, coal.

Wstęp

Pomiary przepuszczalności skał zbiornikowych wykonuje się w przemyśle naftowym od kilkudziesięciu lat. Złoża ropy naftowej i gazu ziemnego w zależności od typu przepuszczalności możemy podzielić na złoża o przepuszczalności porowej, porowo-szczelinowej i szczelinowej. We wszystkich złożach niekonwencjonalnych mamy do czynienia z przepuszczalnością porowo-szczelinową (ze zmiennym udziałem jednego i drugiego typu). Również w węglach obserwuje się naturalne systemy mikroszczelin, wspomagające przepuszczalność matrycy węgla. Problem stanowi określenie rzeczywistej rozwartości mikroszczelin używanej do obliczeń. W złożach klasycznych rozwartość mikroszczelin możemy ocenić

na podstawie porównania przepuszczalności uzyskanej z testu otworowego oraz wyników dla matrycy skalnej i mikroszczelinowości. W otworach wierconych w pokładach węgla nie mamy jeszcze takiej możliwości. Rozwiązanie problemu oparto na badaniach mikroszczelinowości na płytkach cienkich oraz pomiarach przepuszczalności przy uszczelnieniu rdzenia równym ciśnieniu nadkładu. Analizy wykonano na 23 próbkach pobranych z pokładu węgla na głębokości 980 m. Dla wszystkich próbek został wykonany komplet analiz obejmujący przepuszczalność, gęstość objętościową, materiałową, szkieletową, porowatość całkowitą oraz pomiar na płytkach cienkich.

Analiza mikroszczelin

Analizę mikroszczelinowości wykonano zgodnie z metodą opracowaną i stosowaną w INiG – PIB od ponad 30 lat [1, 3, 4, 6, 10, 13]. Badania przeprowadzono wyłącznie na płytkach cienkich polerowanych, rezygnując z pomiarów na zgładach. Wykonane szlify obejmowały cały przekrój poprzeczny walcyka użytego do pomiarów przepuszczalności. Rezygnacja z pomiarów na zgładach była związana ze wstępnym pomia-

rem rozwartości mikroszczelin i otrzymaniem wyników poniżej 0,1 mm (nieliczne mikroszczeliny miały rozwartości powyżej 0,1 mm, ale przyjęto, że jest to związane z uszkodzeniem materiału rdzeniowego). Badania na zgładach przeprowadza się w przypadkach rozwartości mikroszczelin powyżej 0,1 mm.

Analiza mikroskopowa pozwoliła na następujące stwierdzenia:

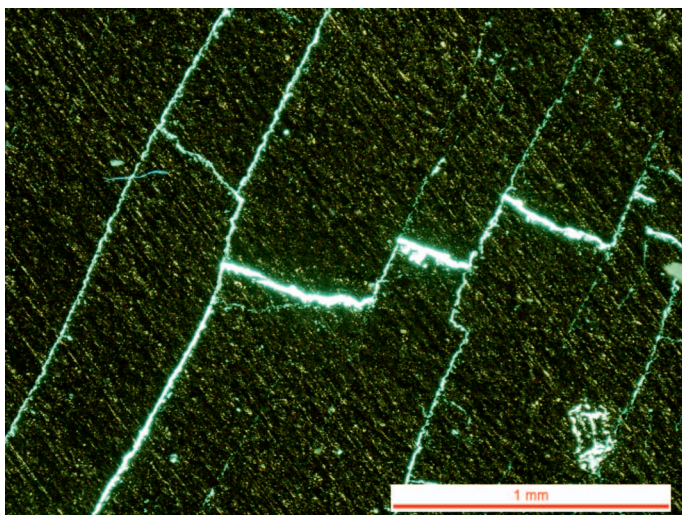
- wszystkie analizowane skały pocięte są siecią mikroszczelin,
- w badanych skałach z reguły obserwujemy dwa lub trzy systemy spękań – pierwsze dwa związane są z systemem kliważu, trzeci związany jest prawdopodobnie z procesami tektonicznymi,
- większość mikroszczelin związana jest z systemem kliważu (ma on regularny przebieg o tym samym kierunku), mikroszczeliny niezwiązane z systemem kliważu z reguły nie mają regularnego przebiegu,
- porowatość wtórna rozwinięta jest wokół mikroszczelin niezwiązanych z systemem kliważu,
- zasięg obserwowanych mikroszczelin wynosi około 2÷3 cm,
- w części próbek obserwuje się szczeliny zabudowane wtórnie (macerałami węgla i substancją mineralną),
- część systemów mikroszczelin wygasa w bardziej porowatych miejscach,
- porowatość obserwowana w matrycy węglowej jest bardzo nierównomiernie rozłożona, w części próbek występują porowate soczewki (wkładki) (mają one formę rodzyneków w cieście), a w części tylko pojedyncze, izolowane pory.

W tabelicy 1 zamieszczono uzyskane wyniki pomiarów mikroszczelinowatości [7, 9, 11]. W kolumnie oznaczonej jako „przepuszczalność intergranularna” zamieszczono wyniki pomiarów przepuszczalności dla azotu, przy uszczelnieniu 400 psi (2,76 MPa), przyjmując, że jest ona wartością, którą można porównywać

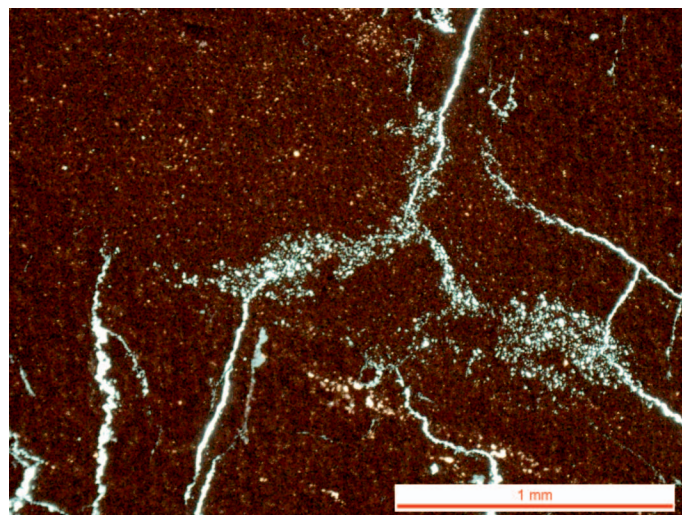
Tablica 1. Wyniki pomiarów mikroszczelinowatości

Numer próbki	Wskaźnik objętościowy szczelin [1/cm]	Porowatość szczelinowa [%]	Przepuszczalność szczelinowa [mD]	Przepuszczalność intergranularna [mD]
1	24,80	7,90	3,38	2,32
2	21,49	6,84	2,93	1,50
3	20,67	6,58	2,81	2,09
4	19,72	6,28	2,68	1,02
5	20,05	6,39	2,73	1,94
6	24,08	7,67	3,28	1,60
7	28,52	9,08	3,88	2,31
8	15,94	5,08	2,17	2,80
9	23,83	7,59	3,24	1,46
10	21,35	6,80	2,91	0,90
11	26,33	8,38	3,58	10,16
12	19,06	6,07	2,60	8,06
13	24,22	7,71	3,30	7,10
14	30,41	9,68	4,14	15,02
15	19,10	6,08	2,60	4,07
16	25,31	8,06	3,45	2,80
17	27,09	8,63	3,69	2,05
18	27,41	8,73	3,73	0,86
19	21,12	6,73	2,87	1,51
20	19,30	6,15	2,63	1,73
21	26,99	8,59	3,67	6,94
22	31,49	10,03	4,29	2,58
23	27,87	8,88	3,79	3,86

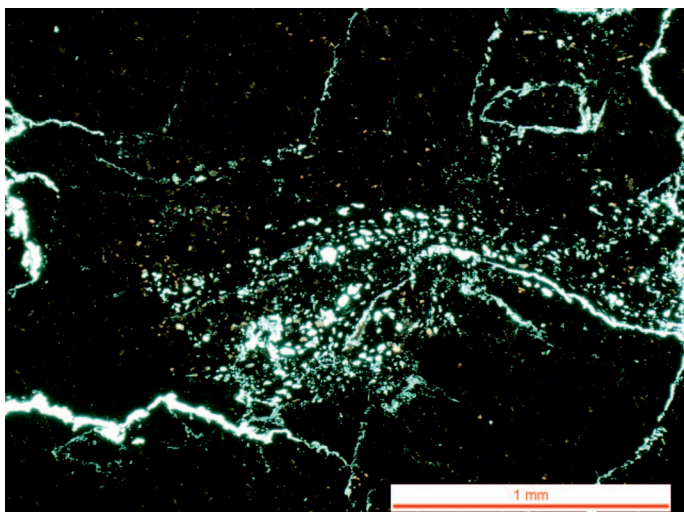
do pomiarów (płytki cienkie) wykonywanych na rozprężonych rdzeniach. We wszystkich obliczeniach przyjęto wartość średnią rozwarości mikroszczelin 0,005 mm (5 μm).



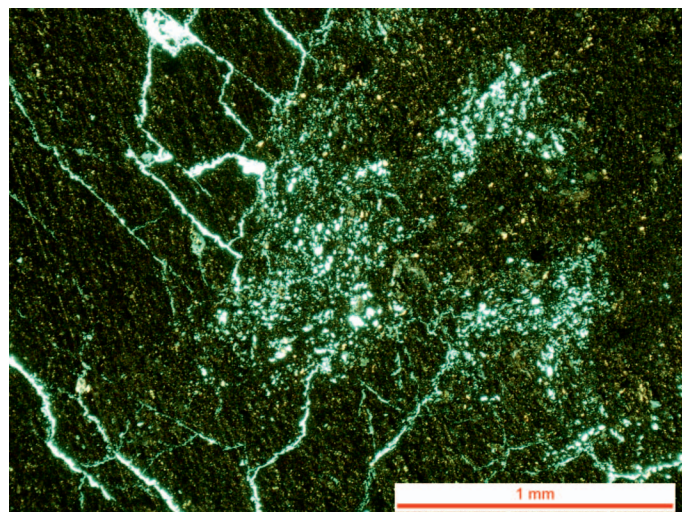
Fot. 1. Mikroszczeliny związane z systemem kliważu



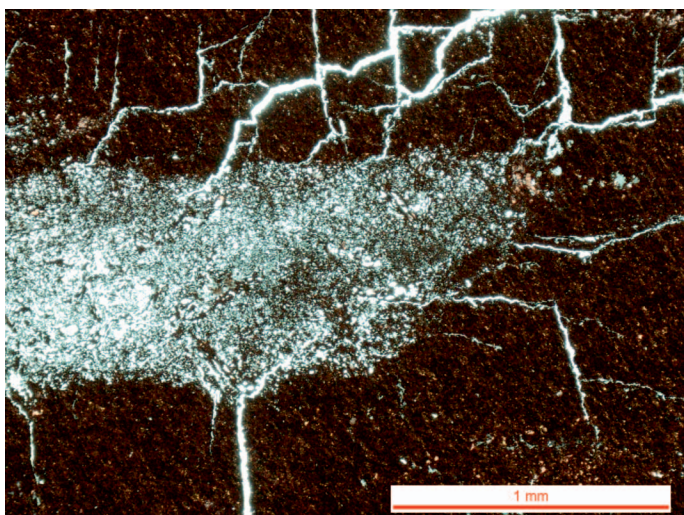
Fot. 2. Porowatość wtórna powstała wokół mikroszczelin niezwiązanych z systemem kliważu



Fot. 3. System mikroszczelin i porowatość w sporynicie



Fot. 5. System mikroszczelin wygasający w porowatym fragmencie węgla



Fot. 4. System mikroszczelin wygasający w porowatym fragmencie węgla

Porównując wartość przepuszczalności uzyskaną na podstawie pomiarów i wyliczoną na podstawie płytek cienkich polerowanych, można stwierdzić, że w przypadku obu tych metod otrzymujemy w miarę spójne wyniki. Wyjątkiem są próbki 11÷14, w których występowały szczeliny o stosunkowo dużej rozwarości (powstałe w wyniku uszkodzenia materiału rdzeniowego). Mówiąc o spójnych (podobnych) wynikach, należy brać pod uwagę rząd wielkości przepuszczalności, a nie porównywać dokładnie poszczególne wyniki.

Przepuszczalność

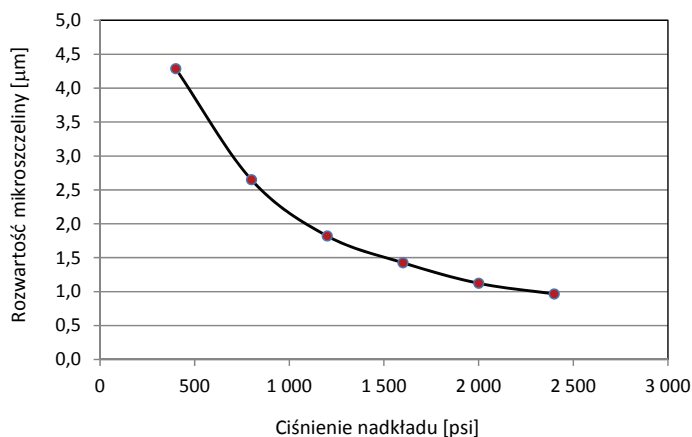
Badania przepuszczalności [12] wykonano na wszystkich próbkach (23). Dla każdej próbki badania przepuszczalności przeprowadzone zostały w sześciu ciśnieniach uszczelniających (symulacja ciśnienia nadkładu 400, 800, 1200, 1600, 2000 i 2400 psi – około 2,76; 5,52; 8,27; 11,03; 13,79 i 16,55 MPa).

Zaobserwowane zmiany w wartości przepuszczalności w zależności od ciśnienia uszczelnienia mogą świadczyć o dwóch procesach zachodzących w badanych skałach. Proces pierwszy to bardzo silna kompaktacja przestrzeni porowej pod wpływem ciśnienia uszczelnienia (nadkładu). Jeśli jednak mielibyśmy do czynienia z tym procesem, to w trakcie drążenia chodników w kopalniach następowałby bardzo silny wpływ metanu i wody z węgla oraz silne kruszenie ścian wokół chodników. Drugim procesem, który wyjaśnia nam takie zachowanie przepuszczalności, jest duży udział przepuszczalności szczelinowej w analizowanych wartościach przepuszczalności. W ba-

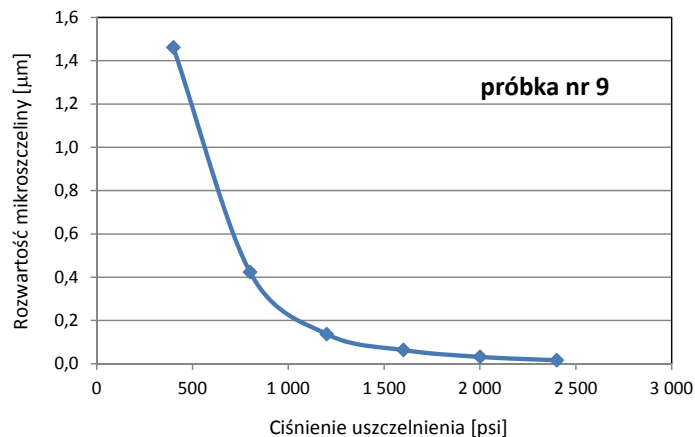
daniach wykonywanych w ramach projektu GASDRAIN [8] stwierdzono, że przepuszczalność matrycy węglowej dla węgla z Kopalni Zofiówka jest na poziomie 300÷1000 nD. Mając na uwadze, że wartości przepuszczalności uzyskane w naszych pomiarach są dużo wyższe, należy przyjąć, że mamy do czynienia z przepuszczalnością opartą na sieci mikroszczelin. Potwierdza to ogląd makroskopowy wszystkich próbek oraz ich zachowanie w trakcie przygotowania próbek do analiz petrofizycznych.

Na rysunku 1 zamieszczono wykres rozwarości mikroszczeliny w zależności od ciśnienia uszczelnienia (nadkładu) dla próbki nr 1. W tabelicy 2 zamieszczono wyniki otrzymane dla tej próbki.

Analizując rysunek 1, widzimy, że drastyczne zmniejszenie rozwarości mikroszczelin związane jest z ciśnieniem uszczelnienia (nadkładu) od 400 psi do 1200 psi. Rozwarości mikroszczeliny zmniejsza się od około 4,2 μm do 1,8 μm .



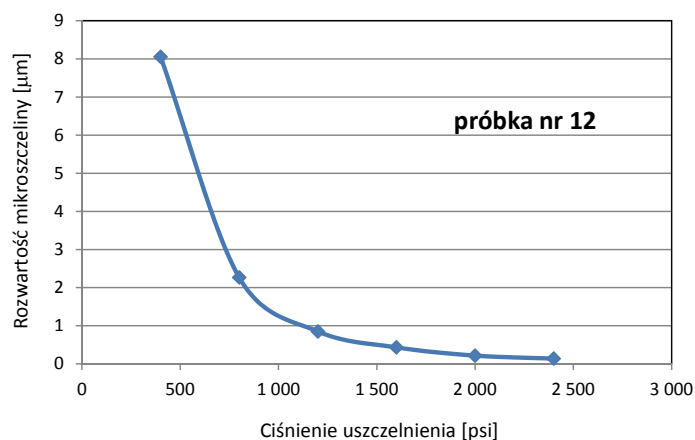
Rys. 1. Zależność rozwartości mikroszczeliny od ciśnienia uszczelnienia



Rys. 2. Typ I zmiany przepuszczalności od ciśnienia uszczelnienia

Tablica 2. Wyliczenie rozwartości mikroszczelin dla próbki nr 1

Numer próbki	Liczba szczelin	Przepuszczalność [mD]	Uszczelnienie [psi]	Rozwartość [μm]
1	29	2,325	400	4,29
1	29	0,548	800	2,65
1	29	0,178	1 200	1,82
1	29	0,086	1 600	1,43
1	29	0,042	2 000	1,12
1	29	0,027	2 400	0,97



Rys. 3. Typ II zmiany przepuszczalności od ciśnienia uszczelnienia

Przy zastosowaniu wyższych ciśnień uszczelnienia obserwowane zmiany nie są już tak dramatyczne – przy ciśnieniu 2400 psi rozwartość mikroszczeliny wynosi 0,9 μm.

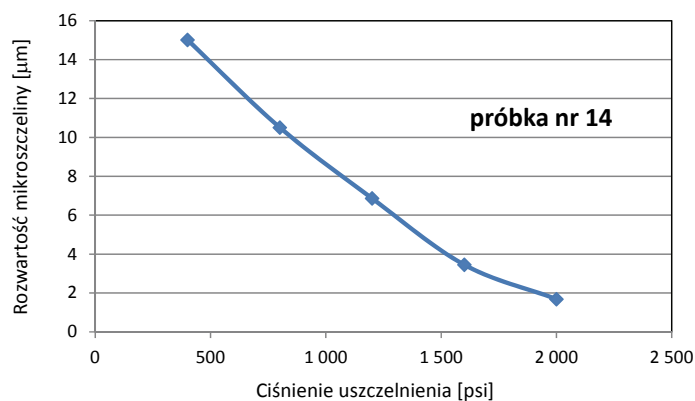
Na podstawie zmian przepuszczalności wraz ze zmianą ciśnienia uszczelnienia (nadkładu) dla wszystkich analizowanych próbek udało się wydzielić trzy typowe krzywe spadku przepuszczalności od ciśnienia uszczelnienia. Zostały one zamieszczone na rysunkach 2–4.

Na rysunku 2 zaprezentowano krzywą spadku przepuszczalności I typu. Szybki spadek przepuszczalności następuje w zakresie ciśnienia uszczelnienia do 1200 psi. Początkowe wartości przepuszczalności oscylują w okolicy 1,5÷4 mD. Powyżej ciśnienia uszczelnienia 1200 psi następuje już powolny spadek wartości przepuszczalności względem ciśnienia uszczelnienia.

Typ II (rysunek 3) to również bardzo silny spadek przepuszczalności w zakresie ciśnienia uszczelnienia do 1200 psi, spadek przepuszczalności następuje do podobnych wartości jak w typie I, jednak wartości początkowe przepuszczalności osiągają wartości dwu- lub nawet trzykrotnie wyższe.

Typ III (rysunek 4) prezentuje nam odmienne zachowanie, obserwujemy stopniowy, prawie liniowy spadek wartości przepuszczalności.

Należałoby się zastanowić, jaka jest przyczyna takiego zachowania próbek (szczelin). W przypadku typu I i II mamy



Rys. 4. Typ III zmiany przepuszczalności od ciśnienia uszczelnienia

prawdopodobnie do czynienia z zamykaniem się otwartych mikroszczelin bez żadnego wypełnienia w ich obrębie (ziaren detrytycznych, okruchów węgla). Typ III to prawdopodobnie mieszanina mikroszczelin czystych, bez żadnego wypełnienia, oraz mikroszczelin „podsadzonych” – w obrębie których występują ziarna detrytyczne lub okruchy węgla. Może o tym świadczyć wysoka wartość przepuszczalności początkowej

(przy uszczelnieniu 400 psi) oraz powolne zamykanie się mikroszczelin (zmniejszanie przepuszczalności).

W tablicach 3 i 4 zamieszczono podstawowe parametry statystyczne dla typu pierwszego i drugiego (wartość średnia, mediana, odchylenie standardowe). Nie zamieszczono tabeli dla typu trzeciego z powodu zbyt małej liczby próbek zaliczonych do tego typu.

Tablica 3. Parametry statystyczne dla typu I

Typ I	Ciśnienie nadkładu [psi]					
	400	800	1200	1600	2000	2400
Średnia [μm]	1,9744	0,5000	0,1902	0,0979	0,0552	0,0322
Mediana [μm]	1,9435	0,4578	0,1781	0,0955	0,0528	0,0290
Odchylenie standardowe	0,8134	0,1860	0,0717	0,0448	0,0295	0,0201

Tablica 4. Parametry statystyczne dla typu II

Typ II	Ciśnienie nadkładu [psi]					
	400	800	1200	1600	2000	2400
Średnia [μm]	7,2228	1,7924	0,7786	0,3823	0,2223	0,1451
Mediana [μm]	7,1007	1,5679	0,5184	0,2648	0,1493	0,1030
Odchylenie standardowe	2,2790	0,8050	0,5766	0,2710	0,1687	0,1054

Rozwartość mikroszczelin

Na podstawie wykonanych badań przepuszczalności dla gazu, opartych na metodyce przedstawionej w pracach G. Leśniaka [2, 5], zostały wyliczone rzeczywiste rozwartości mikroszczelin dla poszczególnych próbek dla ciśnienia uszczelnienia 2400 psi. Wyliczenia wykonano dla ciśnienia uszczelnienia 2400 psi (ponad 16 MPa), ponieważ odpowiada ono ciśnieniom nadkładu dla badanych pokładów węgla. Dla poszczególnych próbek z wykorzystaniem wykonanych płytek cienkich wyliczono liczbę szczelin (szczeliny przecinające całą próbkę) – w większości przypadków są to liczby szczelin związane z kliważem. Uzyskane wyniki zamieszczono w tablicy 5.

W tablicy 5 zamieszczono wyliczone wartości rozwartości mikroszczelin przy ciśnieniu uszczelnienia 2400 psi. Wyliczona rozwartość mikroszczelin zawiera się w przedziale od 0,58 μm do 4,09 μm . Wartości rozwartości mikroszczelin związane są z liczbą szczelin obecnych w próbce oraz z wartością pomierzonej przepuszczalności, wykazują więc korelację z przepuszczalnością. Jeżeli przyjmiemy, że wyliczone wartości są prawidłowe, to szczelin o takich rozwartościach należy się spodziewać w analizowanych pokładach węgla.

Wzory stosowane w analizie mikroszczelin [7, 9, 11] pozwalają również na wyliczenie porowatości szczelinowej – czyli porowatości obejmującej tylko szczeliny. Do jej wyznaczenia podstawowym parametrem jest rozwartość szczelin. Przyjmując, że mamy dobrze wyliczoną rozwartość szczelin (na podstawie pomiarów przepuszczalności), możemy obliczyć prawdziwą porowatość szczelinową. W tablicy 6 zamieszczono wyliczenie porowatości szczelinowej na podstawie rozwartości szczelin zestawionej w tablicy 5 dla ciśnienia uszczelnienia 2400 psi.

W tablicy 6 oprócz porowatości szczelinowej zamieszczono porowatość całkowitą oraz wyliczoną porowatość matrycy (porowatość całkowita – porowatość szczelinowa). Opierając się na danych literaturowych, należałoby przyjąć, że cała porowatość

Tablica 5. Wyliczenie rozwartości mikroszczelin

Numer próbki	Liczba szczelin	Przepuszczalność [mD]	Uszczelnienie [psi]	Rozwartość [μm]
1	29	0,027	2 400	0,97
2	19	0,015		0,92
3	13	0,087		1,86
4	15	0,074		1,69
5	21	0,043		1,26
6	21	0,010		0,77
7	26	0,035		1,10
8	19	0,042		1,29
9	29	0,016		0,81
10	22	0,014		0,85
11	16	0,327		2,72
12	16	0,136		2,01
13	23	0,103		1,63
14	24	1,689		4,09
15	20	0,058		1,41
16	35	0,043		1,06
17	38	0,025		0,85
18	42	0,009		0,58
19	24	0,027		1,02
20	15	0,031		1,26
21	19	0,100		1,71
22	36	0,035		0,98
23	24	0,059		1,33

Tablica 6. Wyliczenie porowatości szczelinowej

Numer próbki	Porowatość szczelinowa [%]	Porowatość całkowita [%]	Porowatość matrycy [%]
1	1,53	10,51	8,98
2	1,26	8,45	7,20
3	2,45	11,35	8,90
4	2,12	10,29	8,17
5	1,60	5,74	4,14
6	1,18	5,94	4,76
7	2,00	8,83	6,83
8	1,31	7,77	6,46
9	1,23	11,21	9,97
10	1,16	9,63	8,48
11	4,57	11,76	7,20
12	2,44	12,13	9,68
13	2,51	7,37	4,86
14	7,91	8,71	0,79
15	1,72	8,07	6,35
16	1,71	6,46	4,75
17	1,48	7,17	5,69
18	1,02	7,01	5,99
19	1,38	6,11	4,73
20	1,55	5,49	3,94
21	2,94	8,14	5,20
22	1,97	14,64	12,67
23	2,37	7,77	5,40

szczelinowa zajęta jest przez wodę, a dla gazu pozostaje wolna tylko porowatość matrycy, w której część porowatości również może być zajęta przez wodę (głównie makropory).

Podsumowanie

Przeprowadzone badania udowodniły, że za wartości przepuszczalności w węglach odpowiadają w większości systemy mikroszpekań. Dlatego też należy położyć większy nacisk na prawidłowe określenie przepuszczalności matrycy węgla (bez mikroszczelin). Będzie to miało znaczenie przy symulacji produkcji gazu z pokładów węgla.

Porowatość w węglach składa się z porowatości szczelinowej oraz porowatości matrycy węgla. Przestrzeń porowa w węglach jest niejednorodna. Fragmenty porowate przeplatają się z fragmentami nieporowatymi. Łącznikami pomiędzy nimi są mikroszczeliny.

Szybka zmiana ciśnienia nadkładu (odprężenie) będzie powodowała w pierwszym momencie duży przyływ metanu do otworu (chodnika), kolejnym etapem będzie częściowe zamknięcie mikroszczelin z powodu spadku w nich ciśnienia (szybki wypływ gazu z mikroszczelin powoduje zwiększenie ciśnienia różnicowego pomiędzy matrycą węgla a szczelinami, co powinno skutkować ich częściowym zamknięciem).

Przeanalizowano wpływ parametrów mikroszczelin na przepuszczalność węgla w warunkach złożowych i pokazano rolę rozwarłości istniejących szczelin na wartość przepuszczalności.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2018, nr 2, s. 79–84, DOI: 10.18668/NG.2018.02.01

Artykuł nadesłano do Redakcji 23.11.2017 r. Zatwierdzono do druku 5.02.2018 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt.: *Zintegrowana metodyka analiz węgla kamiennego pod kątem poszukiwań i eksploatacji CBM* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia 37/SG/2017, nr archiwalny: DK-4100-24/17.

Literatura

- [1] Aguilera R.: *Naturally Fractured Reservoirs*. PennWell Publ. Comp., Tulsa 1980, s. 1–703.
- [2] Leśniak G.: *Estimation of the width of microfractures in shale rocks*. Nafta-Gaz 2015, nr 11, s. 840–846, DOI: 10.18668/NG2015.11.05.
- [3] Leśniak G.: *Mikroszczelinowatość wapieni wizenu z otworu Nosówka-2*. Nafta-Gaz 1992, nr 7–8, s. 165–168.
- [4] Leśniak G., Darlak B.: *Próba kompleksowego przedstawienia parametrów fizycznych złóż szczelinowych na przykładzie wapieni wizenu z odwiertu Nosówka-8*. Nafta-Gaz 1994, nr 8, s. 277–283.
- [5] Leśniak G., Such P., Cicha-Szot R.: *Effect of microfracture on ultratight matrix permeability*. SCA2017-049.
- [6] Nelson R.A.: *Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs*. Gulf Publ. Comp., Houston 1985, s. 1–320.
- [7] Paduszyński J.: *Szacowanie gęstości mikroszczelin metodą trawersów losowych*. Nafta 1965, nr 1, s. 2–3.
- [8] Raport WP1 z projektu GASDRAIN. Archiwum GIG, Katowice 2016.
- [9] Romm E.S.: *Usovierszeństwowanie metoda szlifów dla opriedielienia paramietrow triešcinowatości*. Trudy WNIGRI 1970, s. 290.
- [10] Rydz M.B., Patino J., Elmenti N., Appel M.: *Stressed permeability in shales: effect of matrix compressibility and fractures – a step towards measuring matrix permeability in fractured shale samples*. SCA2016-027.
- [11] Smechov J.M. (red.): *Treščinovatost' gornych porod i treščinno-vye kollektory*. Trudy WNIGRI 1962, vol. 193, s. 1–120.
- [12] Such P.: *Studium badań przestrzeni porowej skal dla potrzeb geologii naftowej*. Prace IGNiG 2000, nr 10.
- [13] Such P., Leśniak G.: *Complex Correlation for Characterisation of Transport System in Fracture Rocks*. Proceedings of 12th Improved Oil Recovery Symposium. Kazań 2002, s. 502–505.



Dr inż. Grzegorz LEŚNIAK
 Adiunkt; kierownik Zakładu Geologii i Geochemii.
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
 ul. Lubicz 25 A
 31-503 Kraków
 E-mail: grzegorz.lesniak@inig.pl