

Mateusz Masłowski, Elżbieta Biały

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Badania zjawiska *embedment* w zabiegach stymulacyjnych

W artykule przedstawiono tematykę związaną ze zjawiskiem *embedment*, czyli wgniataniem ziaren materiału podsadzkowego (ang. *proppant*) w skałę złożową (ścianę szczeliny). Proces ten ma negatywny wpływ na utrzymanie rozwarłości podsadzzonej szczeliny po zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż. Opracowano metodykę badania zjawiska *embedment* oraz zweryfikowano ją analizami laboratoryjnymi przeprowadzonymi na skale łupkowej pochodzącej z polskiego złoża. Do badań zastosowano płyn szczelinujący typu *slickwater*, dwa rodzaje podsadzek, małą koncentrację powierzchniową podsadzki, dwa różne naprężenia ściskające. Wyniki badań mogą służyć do wstępnej oceny efektywności podsadzenia szczeliny w zabiegach hydraulicznego szczelinowania na etapie ich projektowania.

Słowa kluczowe: niekonwencjonalne złoża węglowodorów, hydrauliczne szczelinowanie, proppant, embedment, wgniatanie ziaren podsadzki, rozwarłość szczeliny, materiał podsadzkowy, efektywność podsadzenia szczeliny.

Studies of the embedment phenomenon in stimulation treatments

This paper presents the subject related to the phenomenon of pressing proppant grains in fracture faces (*embedment*). The phenomenon has a negative impact on maintaining fracture width after hydraulic treatment of reservoirs. A methodology of the studies of the embedment phenomenon was developed and verified by laboratory tests on shale rock from an unconventional Polish reservoir. The laboratory tests used fracturing fluid (*slickwater*), two different stresses, two different proppants and small surface concentration of proppant. The test results can be used for a preliminary assessment of the efficiency of propped fracture in the hydraulic treatments of reservoirs at the stage of their design.

Key words: unconventional reservoirs, tight gas, formations hydraulic fracturing, proppant, embedment, pressing proppant grains, width fracture, efficiency propped fracture.

Wprowadzenie

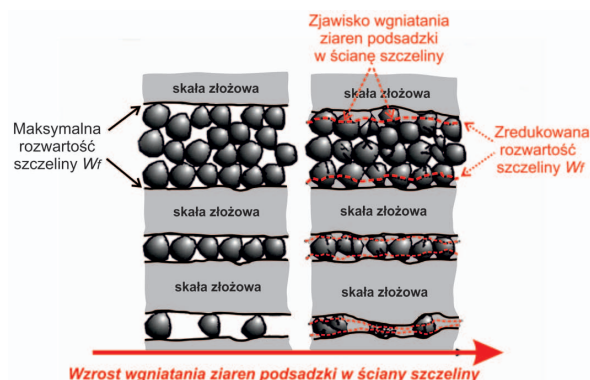
Stosunkowo nową gałęzią przemysłu naftowego jest wydobycie węglowodorów ze złóż niekonwencjonalnych [2, 5, 7, 9, 11]. Aby zabiegi stymulacyjne w formacjach niekonwencjonalnych były skuteczne, należy wytworzyć w nich system licznych szczelin, mikropęknięć umożliwiających uwolnienie się zaadsorbowanego gazu oraz przepływ płynów złożowych z sieci porów do odwiertu [2, 5, 7, 9, 11]. Utrzymanie szczeliny w postaci rozwartej po zabiegu hydraulicznego szczelinowania zależne jest między innymi od odporności materiału podsadzkowego na naprężenia ściskające oraz odporności skały na zjawisko wciskania ziaren podsadzki w ścianę szczeliny, z ang. *embedment* [1, 2, 4–11]. W sylursko-ordowickich skałach łupkowych występujących we

wschodniej części Polski podstawowym składnikiem budującym matrycę skalną są minerały nieilaste – głównie kwarc (60÷70%), z dużą zawartością minerałów ilastych – przede wszystkim illitu (30÷40%) [5, 7]. W przypadku obecności minerałów ilastych (powyżej 40%) skała łupkowa charakteryzuje się wysokim stopniem plastyczności, a tym samym jest podatna na wgniatanie ziaren podsadzki w ścianę szczeliny po zabiegach stymulacyjnych [5, 7]. Do szczelinowania złóż niekonwencjonalnych stosuje się: technologię *slickwater*, żele polimerowe, sieciowane żele polimerowe, płyny na bazie środków powierzchniowo czynnych, piany, ciekły dwutlenek węgla [1, 2, 6]. Rodzaj płynów szczelinujących wpływa na wielkość zjawiska *embedment*.

Wpływ zjawiska *embedment* na rozwartość szczeliny wypełnionej podsadzką

Oprócz sposobu transportu i umieszczania materiału podsadzkowego w wytworzonej szczelinie na efektywność jej podsadzenia oraz uzyskanie odpowiedniej przewodności wpływa między innymi podatność skały złożowej na wgniatanie ziaren podsadzki w ścianę szczeliny, tzw. *embedment* [1, 5, 7–9]. Zjawisko to powoduje spadek rozwartości szczeliny W_f , a tym samym przyczynia się do spadku przewodności szczeliny wypełnionej podsadzką [4, 5, 7, 8, 9, 12, 14] (rysunek 1). Ma ono miejsce podczas zamykania się wytworzonej szczeliny podczas zabiegu hydraulicznego szczelinowania.

Literatura [1, 3, 5, 7, 10, 11] podaje, że na wielkość zjawiska *embedment* wpływa między innymi: rodzaj skały (skład mineralogiczny), właściwości mechaniczne skały złożowej (moduł Younga, współczynnik Poisson’a), rodzaj materiału podsadzkowego, wielkości naprężeń ściskających w złożu, czas oddziaływania naprężeń ściskających

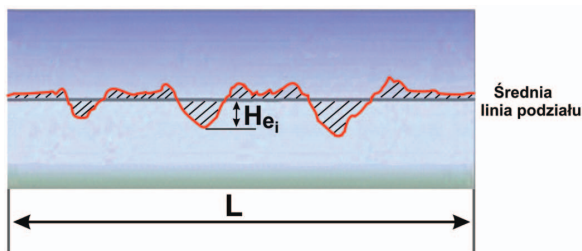


Rys. 1. Wpływ zjawiska *embedment* na efektywne utrzymanie rozwartości szczeliny wypełnionej podsadzką po zabiegu hydraulicznego szczelinowania [4, 5, 7, 12]

rodzaj płynów szczelinujących i złożowych, technologia eksploatacji złoża.

Metodyka badania zjawiska *embedment*

Do badań wykorzystano metodykę opracowaną w INiG – PIB [5, 7, 8]. Chropowatość wyznacza się pod mikroskopem stereoskopowym (rysunek 3c), umożliwiającym cyfrowe obrazowanie oraz analizę chropowatości powierzchni szczeliny. Dla kilku wytypowanych obszarów na powierzchni ściany szczeliny wykonuje się cyfrowy obraz, a następnie dla każdego z nich wyznacza się średnią chropowatość z kilku profili chropowatości wzdłuż wytypowanych odcinków pomiarowych. Metodę wyznaczenia chropowatości powierzchni wzdłuż danego odcinka pomiarowego przedstawiono na rysunku 2 [5, 7, 9] oraz przy pomocy równania 1 [5, 7–9].



Rys. 2. Przykładowy profil chropowatości powierzchni wzdłuż odcinka pomiarowego dla wytypowanego obszaru na powierzchni czołowej ściany szczeliny [5, 7, 9]

$$R = \frac{\sum_{i=0}^n H_{p_i} + \sum_{i=0}^n H_{v_i}}{n_p + n_v} \quad (1)$$

gdzie:

R – chropowatość profilu powierzchni wzdłuż odcinka pomiarowego [mm],

H_p – wysokość szczytu [mm],

H_v – głębokość doliny [mm],

n_p – liczba wszystkich szczytów [-],

n_v – liczba wszystkich dolin [-].

Średnią chropowatość R_{sr} dla całej powierzchni ściany szczeliny określa się jako średnią arytmetyczną z chropowatości profili wyznaczonych dla poszczególnych wytypowanych obszarów.

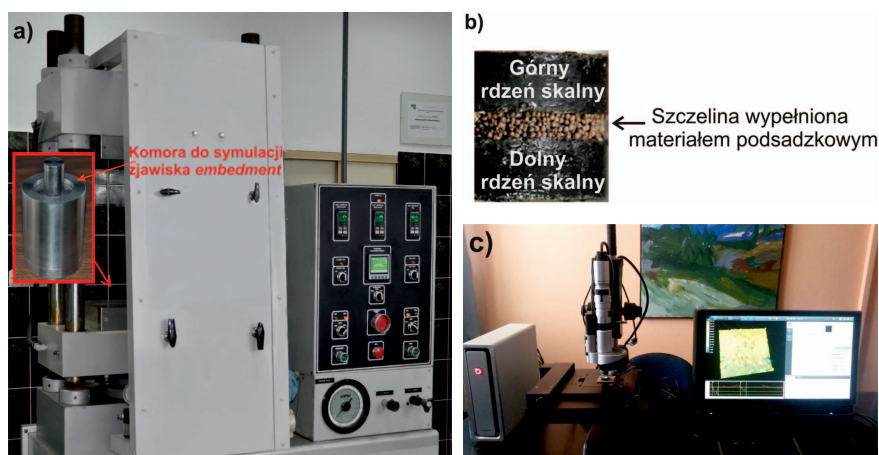
Następnie podsadzkę umieszcza się pomiędzy dwoma cylindrycznymi rdzeniami skalnymi w komorze pomiarowej (rysunek 3b) [5, 7, 8], poddając ją działaniu naprężenia ściskającego przez zadany odcinek czasu. Po upływie tego okresu rozbiera się komorę i analizuje powierzchnie rdzeni pod mikroskopem stereoskopowym (rysunek 3c) [5, 7, 8], umożliwiającym ich cyfrowe obrazowanie oraz analizę.

Analiza powierzchni rdzenia polega na określeniu średniej głębokości wgniecení ziaren podsadzki w ścianę szczeliny. Metodę wyznaczenia głębokości wgniecení ziaren (dolin) w powierzchnię szczeliny wzdłuż odcinka pomiarowego przedstawiono na rysunku 4 oraz przy pomocy równania 2 [5, 7, 8].

$$H_e = \frac{\sum_{i=0}^n H_{e_i}}{n_e} \quad (2)$$

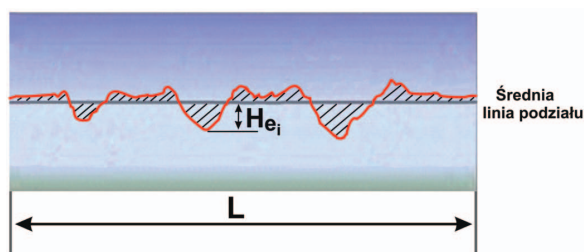
gdzie:

H_e – średnia głębokość wgniecení ziaren podsadzki w ścianę szczeliny dla profilu, wzdłuż odcinka pomiarowego [mm],



Rys. 3. Stanowisko badawcze:
a) prasa hydrauliczna wraz z komorą do symulacji zjawiska *embedment* w INiG – PIB; b) schemat umieszczenia materiału podsadzkowego w szczelinie; c) mikroskop stereoskopowy wraz z oprogramowaniem [5, 7]

H_{ei} – głębokość doliny [mm],
 n_e – liczba wszystkich dolin [-].



Rys. 4. Przykładowy profil głębokości wgniecia ziaren (dolin) wzdłuż odcinka pomiarowego dla wytypowanego obszaru na powierzchni ściany szczeliny [5, 7]

Całkowitą średnią głębokość H_{ec} wgniecia ziaren podsadzki w ścianie szczeliny [mm] określa się według równania 3 [5, 7, 8]:

$$H_{ec} = H_{e_{sr.g}} + H_{w_{sr.d}} \quad (3)$$

gdzie:

$H_{e_{sr.g}}$ – średnia głębokość wgniecia ziaren podsadzki w górnej ścianie szczeliny, będąca średnią arytmetyczną uzyskanych wartości dla poszczególnych wytypowanych obszarów [mm],

$H_{e_{sr.d}}$ – średnia głębokość wgniecia ziaren podsadzki w dolnej ścianie szczeliny, będąca średnią arytmetyczną uzyskanych wartości dla poszczególnych wytypowanych obszarów [mm].

Badania laboratoryjne zjawiska *embedment*

Do badań wykorzystano skałę typu łupkowego, pochodzącą z polskiego złoża. Posiadała ona w swoim składzie mineralogicznym między innymi: 24,4% kwarcu, 14,2% węglanów, 47,7% minerałów ilastych oraz 13,7% pozostałych minerałów [5, 7]. Znaczną ilość zabiegów w skałach łupkowych przeprowadza się z użyciem cieczy nieagresywnej o niskiej lepkości, tzw. technologia *slickwater*. Płyn szczelinujący użyty do badań składał się z następujących substancji: woda wodociągowa, biocyd, środek (stabilizator) zapobiegający pęcznieniu minerałów ilastych i łupkowych, mikroemulsja, środek ograniczający opory przepływu (poliakrylamid). Do podsadzenia szczeliny została wykorzystana podsadzka kwarcowa 40/70 oraz lekka podsadzka ceramiczna 40/70. Rozmiar ich ziaren wynosił $0,425 \pm 0,212$ mm (tj. 40÷70 mesh).

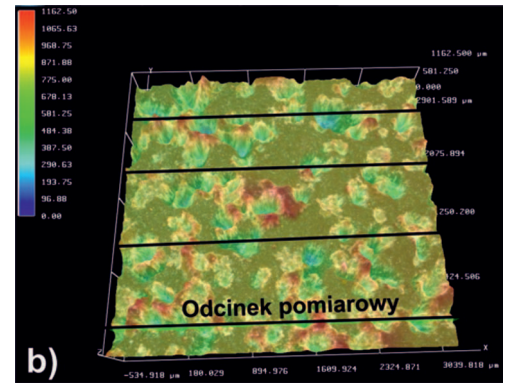
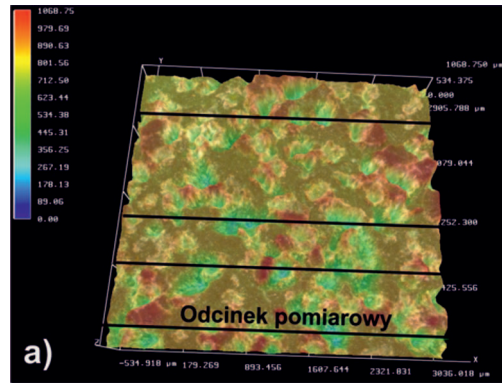
W pierwszej kolejności wyznaczono średnią pierwotną chropowatość dla całej powierzchni czołowej rdzenia (ściany szczeliny). Wynosiła ona $0,00047$ mm ($\pm 0,00006$ mm) [5, 7]. Następnie wykonano laboratoryjną symulację zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w ścianie szczeliny dla podsadzki kwarcowej (test nr 1) oraz dla lekkiej podsadzki ceramicznej

(test nr 2). Badania wykonano na prasie hydraulicznej (rysunek 3a), według uprzednio przedstawionej metodyki badawczej. Cylindryczne rdzenie skalne były wcześniej nasycone płynem szczelinującym przez okres 24 godzin w temperaturze pokojowej. Całkowitą średnią głębokość wgniecia ziaren podsadzki w ścianie szczeliny wyznaczano z czterech odcinków pomiarowych dla dwóch obszarów, wytypowanych na powierzchni czołowej górnego i dolnego rdzenia dla testu nr 1 (rysunki 5a, b, c, d) oraz dla testu nr 2 (rysunki 6a, b, c, d). Dodatkowo wykonano badania maksymalnej, możliwej do uzyskania, rozwartości podsadzonej szczeliny. W badaniach tych podsadzka była umieszczana pomiędzy dwiema cylindrycznymi kształtkami stalowymi o twardości 48HRC (dla wykluczenia zjawiska *embedment*) w warunkach odpowiadającym testom nr 3 i 4. Badania przeprowadzono na prasie hydraulicznej dodatkowo wyposażonej w szczelinościomierz LVDT. Warunki wykonania testów zostały przedstawione w tablicy 1.

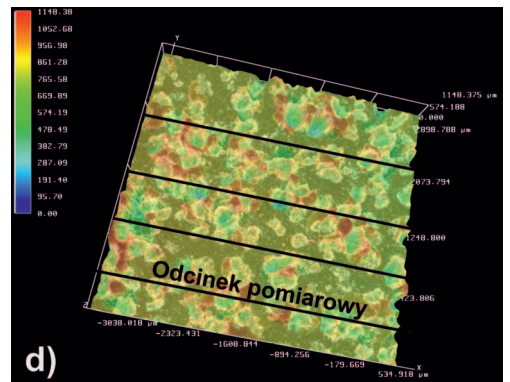
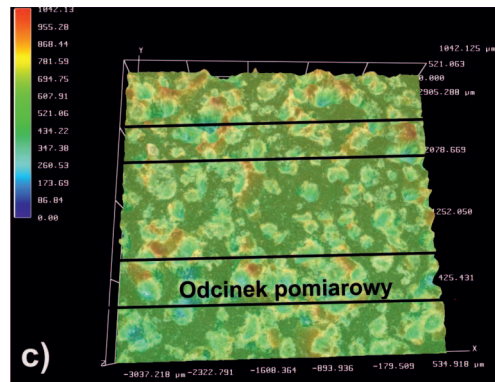
Niepewność oszacowanej rozwartości szczeliny wypełnionej materiałem podsadzkowym, wyznaczona na podstawie dokładności szczelinościomierza LVDT, wynosiła 0,001 mm.



Powierzchnia czołowa
górnego rdzenia



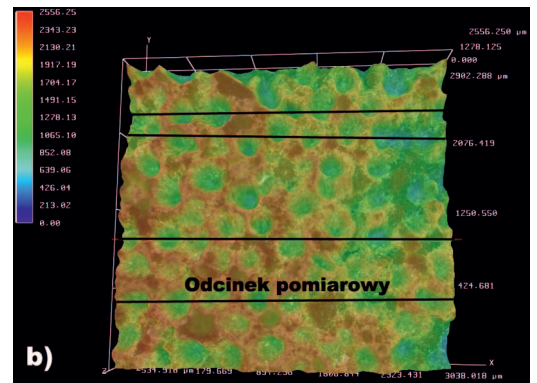
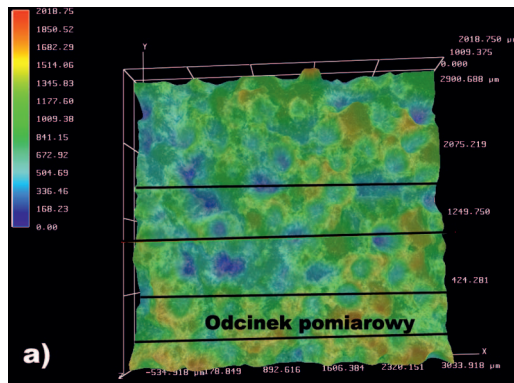
Powierzchnia czołowa
dolnego rdzenia



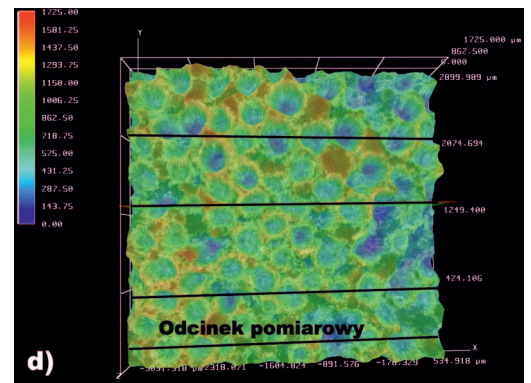
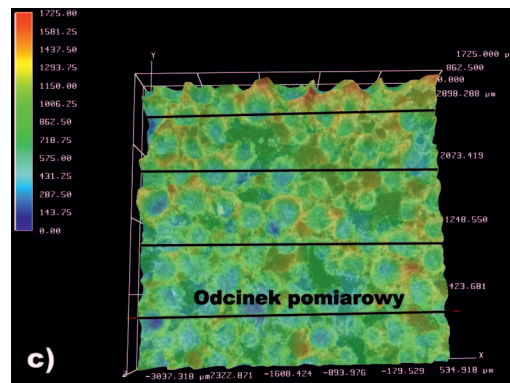
Rys. 5. Określenie średniej głębokości wgniecień ziaren podsadzki w ściany szczeliny, test nr 1, dla górnego rdzenia: a) obszar nr 1, b) obszar nr 2; dla dolnego rdzenia: c) obszar nr 1, d) obszar nr 2 [5, 7]



Powierzchnia czołowa
górnego rdzenia



Powierzchnia czołowa
dolnego rdzenia



Rys. 6. Określenie średniej głębokości wgniecień ziaren podsadzki w ściany szczeliny, test nr 2, dla górnego rdzenia: a) obszar nr 1, b) obszar nr 2; dla dolnego rdzenia: c) obszar nr 1, d) obszar nr 2 [7]

Niepewność oszacowanej całkowitej średniej głębokości wciśnięcia ziaren materiału podsadzkowego w ściany szczeliny (skałę), wyznaczona na podstawie odchylenia standardowego od wartości średniej, nie przekraczała 0,042 mm.

Dla określenia wpływu zjawiska *embedment* na efektywność podsadzenia szczeliny po zabiegu hydraulicznego szczelinowania złoża wyznaczono rozwartość szczeliny W_f wypełnionej materiałem podsadzkowym [mm], według równania 4, oraz procentowy spadek rozwartości szczeliny PSW_f wypełnionej podsadzką z uwzględnieniem zjawiska *embedment* [%], na podstawie równania 5.

$$W_f = W_{fm} - H_{ec} \quad (4)$$

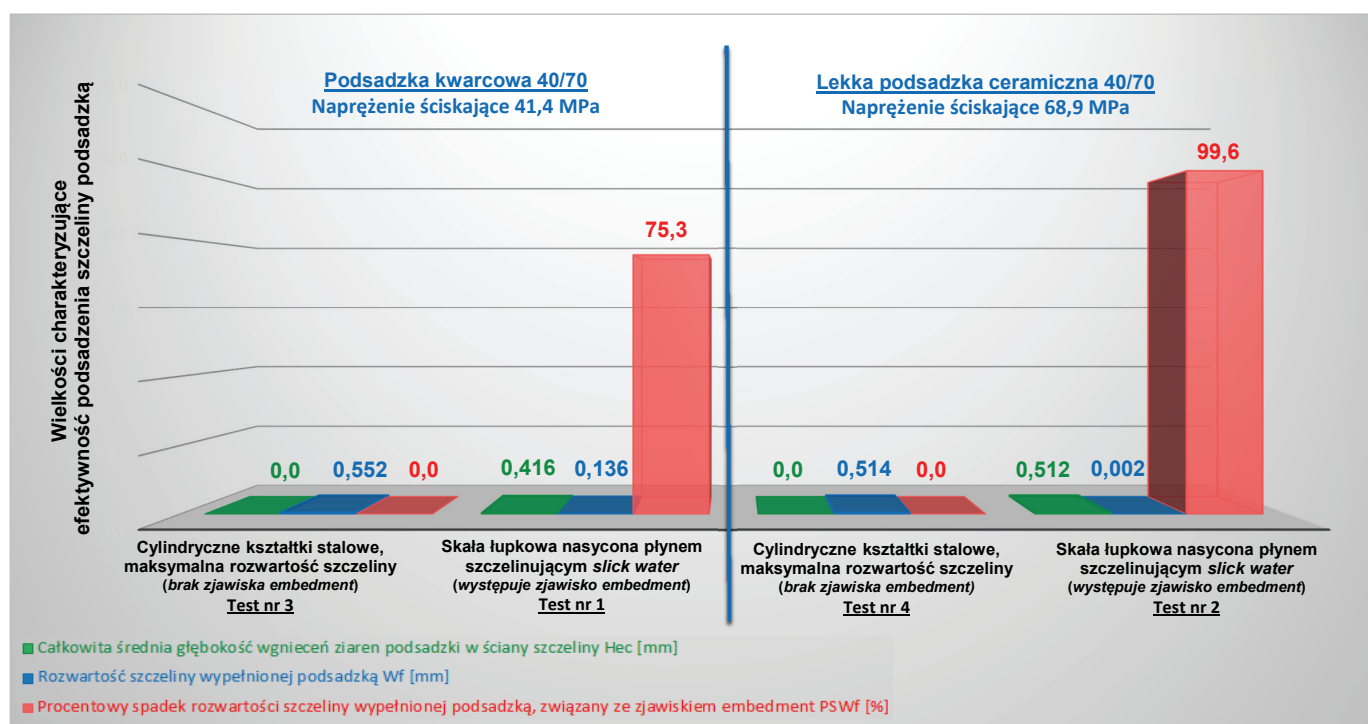
gdzie: W_{fm} – maksymalna możliwa do uzyskania rozwartość szczeliny wypełnionej materiałem podsadzkowym, bez występowania zjawiska *embedment* [mm].

Tablica 1. Warunki wykonania testów

Temperatura testu [°C]	28,0
Koncentracja powierzchniowa podsadzki [kg/m ² (lb/ft ²)]	0,98 (0,2)
Czas działania zadanego naprężenia ściskającego [godz.]	6
Dla podsadzki kwarcowej 40/70 – Testy nr 1 i nr 3	
Zadane naprężenie ściskające [MPa (psi)]	41,4 (6000)
Dla lekkiej podsadzki ceramicznej 40/70 – Testy nr 2 i nr 4	
Zadane naprężenie ściskające [MPa (psi)]	68,9 (10 000)

$$PSW_f = \frac{H_{ec}}{W_{fm}} \cdot 100 \quad (5)$$

Wyniki badań przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Wpływ zjawiska *embedment* na efektywność podsadzenia szczeliny podsadzką kwarcową 40/70 oraz ceramiczną 40/70 o koncentracji powierzchniowej 0,98 kg/m², po zabiegu hydraulicznego szczelinowania

Podsumowanie

Dla szczeliny wypełnionej podsadzką kwarcową 40/70, znajdującą się pomiędzy nasyconymi płynem szczelinującym rdzeniami ze skały łupkowej (w warunkach testu nr 1), uzyskano całkowitą średnią głębokość H_{ec} wgniecia ziaren podsadzki w ściany szczeliny rzędu 0,416 mm. Zjawisko *embedment* spowodowało spadek rozwartości szczeliny o 75,3% w stosunku do jej maksymalnej rozwartości 0,552 mm (bez zjawiska *embedment*), możliwej do otrzymania w warunkach testu nr 3. Natomiast dla nasyconych

płynem szczelinującym rdzeni ze skały łupkowej i szczeliny wypełnionej lekką podsadzką ceramiczną 40/70 (w warunkach testu nr 2) uzyskano H_{ec} rzędu 0,512 mm. Zwiększenie naprężenia ściskającego do wartości 68,9 MPa spowodowało wzrost zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w skałę łupkową do wartości 0,512 mm. W związku z tym maksymalna rozwartość podsadzonej szczeliny, wynosząca 0,514 mm (bez zjawiska *embedment*) w warunkach testu nr 4, zmniejszyła się o 99,6%. W oparciu o uzyskane wy-

niki można wnioskować, że nasycona płynem szczelinującym badana skała łupkowa charakteryzuje się podwyższoną plastycznością, małą efektywnością podsadzenia szczeliny oraz słabą odpornością na zjawisko *embedment*. Tym

samym przy wyższych naprężeniach ściskających dochodzi do całkowitego zamknięcia się szczeliny wypełnionej podsadzką, w szczególności dla niskiej koncentracji powierzchniowej podsadzki rzędu $0,98 \text{ kg/m}^2$ (tj. $0,2 \text{ lb/ft}^2$).

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2016, nr 12, s. 1101–1106, DOI: 10.18668/NG.2016.12.13

Artykuł nadesłano do Redakcji 18.10.2016 r. Zatwierdzono do druku 24.11.2016 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Badania zjawiska wciskania ziaren materiału podsadzkowego w ściany szczeliny po zabiegu szczelinowania* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0020/KS/14, nr archiwalny: DK-4100-20/14.

Literatura

- [1] Alramahi B., Sundberg M.I.: *Proppant embedment and conductivity of hydraulic fractures in shales*. American Rock Mechanics Association, 46th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 24–27.06.2012, Chicago, Illinois. ARMA 12-291.
- [2] Czupski M., Kasza P., Wilk K.: *Płyny do szczelinowania złóż niekonwencjonalnych*. Nafta-Gaz 2013, nr 1, s. 42–50.
- [3] Ghassemi A., Suarez-Rivera R.: *Sustaining fracture area and conductivity of gas shale reservoirs for enhancing long-term production and recovery*. Projekt nr 08122-48, RPSEA, 15.05.2012.
- [4] Legarth B., Huenges E., Zimmermann G.: *Hydraulic fracturing in a sedimentary geothermal reservoir: Results and implications*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 2005, vol. 42, s. 1028–1041.
- [5] Masłowski M.: *Badania zjawiska wciskania ziaren materiału podsadzkowego w ściany szczeliny po zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych*. Nafta-Gaz 2015, nr 7, s. 461–471.
- [6] Masłowski M.: *Materiały podsadzkowe do zabiegów hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych*. Nafta-Gaz 2014, nr 2, s. 1–86.
- [7] Masłowski M. i zespół: *Badania zjawiska wciskania ziaren materiału podsadzkowego w ściany szczeliny po zabiegu szczelinowania*. Praca statutowa Instytutu Nafty i Gazy – PIB, Krosno, październik 2014, nr zlecenia 20/KS/14, nr archiwalny: DK-4100-20/147, s. 1–78.
- [8] Masłowski M. i zespół: *Sposób wyznaczania zmniejszenia wysokości podsadzonej szczeliny*. Zgłoszenie patentowe nr P.412971, 30.06.2015.
- [9] Morales H.: *Sustaining fracture area and conductivity of gas shale reservoirs for enhancing long-term production and recovery*. RPSEA Unconventional Gas Conference 2012: Geology, the Environment, Hydraulic Fracturing, Canonsburg 17–18.04.2012.
- [10] Reinicke A., Legarth B., Zimmermann G., Huenges E., Dresen G.: *Hydraulic fracturing and formation damage in a sedimentary geothermal reservoir*. ENGINE – Enhanced Geothermal Innovative Network for Europe Workshop 3, “Stimulation of reservoir and microseismicity” Kartause Ittingen, Zürich, 29.04–1.07.2006.
- [11] Reinicke A., Rybacki E., Stanchits S., Huenges E., Dresen G.: *Hydraulic fracturing stimulation techniques and formation damage mechanisms – Implications from laboratory testing of tight sandstone – proppant systems*. Chemie der Erde 2010, vol. 70, s. 107–117.
- [12] Sato K., Ichikawa M.: *Post-Frac analysis indicating multiple fractures created in a volcanic formation*. SPE 39513, Proceedings SPE India oil and gas conference and exhibition, New Delhi 1998, s. 1–10.
- [13] Suarez-Rivera R., Behrmann L., Burghardt J., Stanchits S., Edelman E., Surdi A.: *Defining three regions of hydraulic fracture connectivity in unconventional reservoirs, help designing completions with improved long-term productivity*. SPE 166505, 2013.
- [14] Volk L.J., Raible C.J., Carrol H.B., Spears J.S.: *Embedment of high strength proppant into low-permeability reservoir rock*. SPE/DOE 9867, 1981.



Mgr inż. Mateusz MASŁOWSKI
Asystent w Zakładzie Stymulacji Wydobywania Węglowodorów.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: mateusz.maslowski@inig.pl



Mgr inż. Elżbieta BIAŁY
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Stymulacji Wydobywania Węglowodorów.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: elzbieta.bialy@inig.pl