

Mateusz Maślowski

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Badania zjawiska wciskania ziaren materiału podsadzkowego w ściany szczeliny po zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych

W artykule została przedstawiona tematyka związana z technologią tworzenia szczelin i mikropęknięć w skale oraz ze zjawiskiem wciskania ziaren materiału podsadzkowego w ściany szczeliny po zabiegu hydraulicznego szczelinowania, tzw. *embedment*. Opracowano metodykę badania zjawiska *embedment* oraz zweryfikowano ją testami laboratoryjnymi. Badania wykonano dla skały łupkowej, pochodzącej z polskiego złoża niekonwencjonalnego, suchych i nasyconych płynem szczelinującym rdzeni, dwóch naprężeń ściskających oraz małej koncentracji powierzchniowej podsadzki. Wyniki badań mogą być jedną z metod oceny poprawności zastosowania podsadzki–propantu w zabiegach szczelinowania złóż niekonwencjonalnych.

Słowa kluczowe: zjawisko *embedment*, materiał podsadzkowy, efektywne podsadzenie szczeliny, zabiegi hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych.

Studies of the embedment phenomenon after the hydraulic fracturing treatment of unconventional reservoirs

This article presents the subject related to the technology used in the creating of fractures and microcracks in rock and the subject related to the phenomenon of pressing proppant grains in the fracture walls after hydraulic fracturing, known as embedment. Methodology studies of the embedment phenomenon was developed and it was verified by laboratory tests. The studies were performed for shale rocks originating from unconventional Polish deposits, dry and saturated cores by fracturing fluid, two compressive stress and low surface concentration of proppant. The test results can be one of the methods for evaluating the correctness of the use of proppant in the fracturing of unconventional reservoirs.

Key words: phenomenon of embedment, proppant material, effective propped fracture, hydraulic fracturing in the unconventional reservoirs.

Wstęp

Wydobycie węglowodorów ze złóż niekonwencjonalnych jest stosunkowo nową gałęzią przemysłu naftowego. Złóża niekonwencjonalne to między innymi: złoża typu zamkniętego (z ang. *tight gas*) oraz formacje łupkowe (z ang. *shale gas*) [4, 5, 11, 15]. Złóża typu zamkniętego (*tight gas*) charakteryzują się małą przepuszczalnością i porowatością. Ich przepuszczalność dla gazu wynosi nie więcej niż 0,1 mD [11]. W skałach tych podstawowym składnikiem budującym matrycę skalną jest kwarc. Zło-

ża typu łupkowego (*shale gas*) charakteryzują się matrycą o bardzo niskiej porowatości oraz przepuszczalności (w niektórych przypadkach poniżej 0,001 mD). W łupkach podstawowym składnikiem budującym matrycę skalną są minerały nieilaste – głównie kwarc (60÷70%), z dużą zawartością minerałów ilastych – przede wszystkim illitu (30÷40%) [11]. W przypadku obecności minerałów ilastych (powyżej 40%) skała łupkowa charakteryzuje się wysokim stopniem plastyczności oraz niskim modułem

Younga i wysokim współczynnikiem Poissona. Wielkości te, wskazując na sprężystość materiału, powodują znaczne zmniejszenie przepływu gazu przez formację złożową, a tym samym eksploatacja tego typu złóż jest trudniejsza. Płyn szczelinujący jest zatłaczany z małą wydajnością, około 8 m³/min. Skąły łupkowe charakteryzujące się dużą zawartością kwarcu lub węglanów są kruche, posiadają wysoki moduł Younga oraz niski współczynnik Poissona, a tym samym bez trudu tworzą się w nich szczeliny, spękania. Dlatego łatwiej jest wypełnić je materiałem podsadzkowym powodującym pozostanie szczeliny w stanie rozwarcia po zakończeniu zabiegu stymulacyjnego. Płyn szczelinujący jest tutaj zatłaczany z dużą wydajnością, około 20 m³/min.

Do szczelinowania złóż niekonwencjonalnych stosuje się: roztwory naturalnych polimerów liniowych, środki

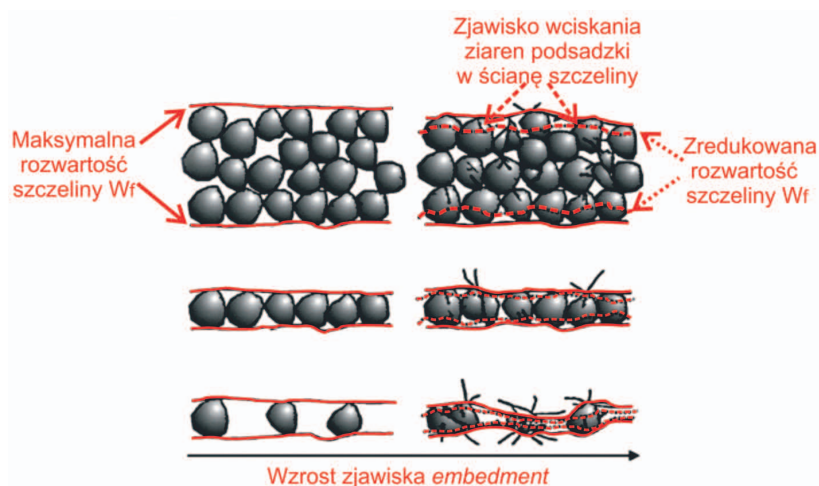
ograniczające opory przepływu (poliakryloamid), piany, sieciowany żel polimerowy (lub w połączeniu z pianą), a także zabiegi hybrydowe [3, 4, 5, 9, 11, 13, 15]. Aby zabiegi stymulacyjne w formacjach łupkowych były skuteczne, należy wytworzyć w nich system licznych szczelin, mikro-pęknięć umożliwiających uwolnienie się zaadsorbowanego gazu oraz przepływ płynów złożowych z sieci porów do odwiertu [9, 11, 12]. Wytworzone liczne szczeliny i spękania w formacjach typu łupkowego charakteryzują się małą wysokością i rozwarością oraz dużym zasięgiem w złożu, umożliwiającym ich kontakt z naturalnymi mikroszczelinami. Geometria wytworzonych szczelin jest bardzo złożona i zależna od obszarów zdolnych do pęknięcia. System licznych szczelin pozwala na uzyskanie dużej powierzchni kontaktu złoża z odwiertem.

Przedstawienie zjawiska wciskania materiału podsadzkowego w ścianę szczeliny wytworzonej po zabiegu hydraulicznego szczelinowania

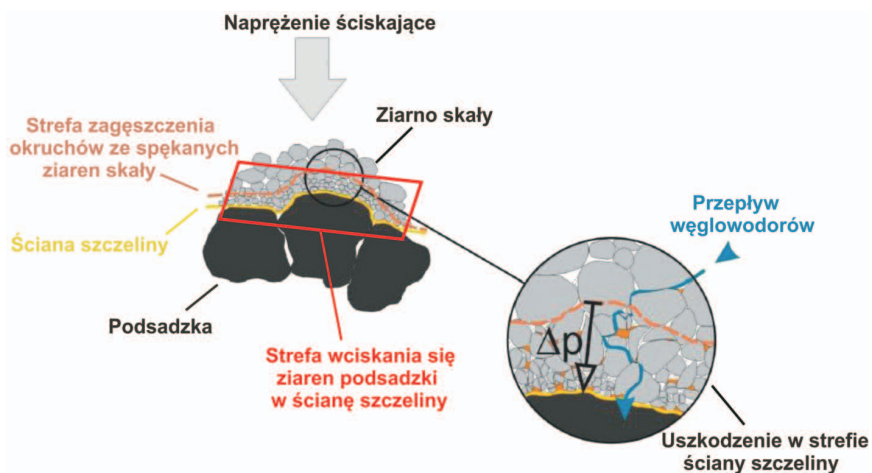
Oprócz sposobu transportu i umieszczenia podsadzki w szczelinie, na efektywność jej podsadzenia oraz uzyskanie odpowiedniej przewodności wpływa również zjawisko wciskania się ziaren materiału podsadzkowego w ścianę szczeliny, tzw. *embedment* [11, 14, 15, 18]. Ma ono miejsce podczas zamykania się szczeliny po zabiegu hydraulicznego szczelinowania. Zjawisko to wpływa na uszkodzenie strefy ściany szczeliny, zmniejszenie się wysokości w_f wytworzonej szczeliny (rysunek 1), a tym samym – powoduje spadek jej przepuszczalności i przewodności [10, 14, 15, 16, 19].

Może tutaj również dochodzić do zjawiska kruszenia się ziaren skały złożowej w okolicach ściany szczeliny, powodującego wzrost zagęszczania się ich okruchów w tej strefie. Wpływa to na ograniczenie powierzchni kontaktu złoża z wytworzoną i podsadzoną szczeliną oraz ograniczenie przepływu uwolnionych węglowodorów przez liczne spękania i mikro-pęknięcia znajdujące się w skale złożowej do odwiertu poprzez wytworzoną szczelinę (rysunek 2) [14, 15]. Dotyczy to tzw. uszkodzenia strefy ścianki szczeliny (z ang. *fracture face skin*) [15].

Literatura [2, 6, 14, 15, 17] podaje, że na wielkość zjawiska *embedment* wpływa między innymi: rodzaj skały (skład mineralogiczny), właściwości mechaniczne skały złożowej (moduł Younga, współczynnik



Rys. 1. Wpływ zjawiska wciskania wielu ziaren materiału podsadzkowego w ścianę szczeliny na wysokość w_f podsadzki szczeliny, dla różnej koncentracji powierzchniowej podsadzki [10, 16]



Rys. 2. Zjawisko wciskania ziaren materiału podsadzkowego w ścianę wytworzonej szczeliny po zakończeniu zabiegu szczelinowania [14]

Poissona), rodzaj materiału podsadzkowego, wielkości naprężeń ściskających w złożu, czas oddziaływania naprężeń ściskających, rodzaj płynów szczelinujących i złożowych, temperatura oraz technologia eksploatacji złoża.

Od wielu lat podejmuje się szereg badań laboratoryjnych oraz prób matematycznego obrazowania (modelowania) zjawiska wciskania wielu ziaren podsadzki w ściany wytworzonej szczeliny w skale złożowej [2, 8, 12, 14, 15, 18]. Mają one

Metodyka badania zjawiska wciskania ziaren podsadzki w ściany wytworzonej szczeliny

Prawidłowe wykonanie laboratoryjnej symulacji wciskania ziaren podsadzki w ściany wytworzonej szczeliny oraz analiza uzyskanych wyników wymagają:

Charakterystyki warunków złożowych oraz technologii wykonania zabiegu hydraulicznego szczelinowania złoża [7]

W tym celu należy zebrać informacje odnośnie: głębokości odwiertu dla wykonania zabiegu szczelinowania, temperatury złożowej, wartości ciśnień i naprężeń panujących w złożu (ciśnienie zamknięcia szczeliny), prędkości zaciskania się szczeliny w warunkach złożowych, rodzaju płynów złożowych, typu materiału podsadzkowego, koncentracji materiału podsadzkowego, rodzaju płynów użytych do zabiegu szczelinowania, przewidywanego zasięgu oraz obszaru utworzonych szczelin po zabiegu szczelinowania.

Zbadania właściwości skały użytej do badań [1, 2, 8, 15]

Do właściwości skały złożowej zaliczamy między innymi jej skład mineralogiczny oraz własności mechaniczne (statyczny i dynamiczny moduł Younga oraz współczynnik Poissona).

Wyznaczenia podstawowych właściwości materiału podsadzkowego [18, 20, 21, 22]

Podstawowe badania mają na celu stwierdzenie, czy materiał podsadzkowy może być stosowany jako *proppant* do zabiegów hydraulicznego szczelinowania złóż. Wykonuje się je w oparciu o szczegółowo opisane procedury pomiarowe zawarte w normach [20, 21, 22].

Przygotowania próbek skały do badań

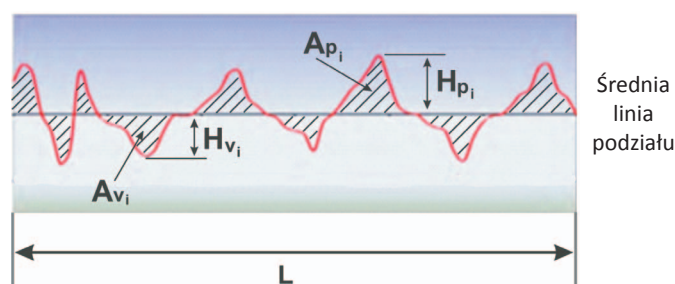
Próbki użyte do badań powinny pochodzić ze skały złożowej odpowiadającej głębokości wykonania zabiegu szczelinowania. Z pobranych rdzeni wiertniczych wycina się cylindryczne rdzenie o średnicy 3,81 cm (1,5 cala) lub 2,54 cm (1 cala). Ważne jest, aby wszystkie cylindryczne rdzenie umożliwiły uzyskanie w badaniach porównywalnej wielkości powierzchni ściany szczeliny dostępnej dla kontaktu jej z materiałem podsadzkowym. Dodatkowo czoła wyciętych

za zadanie określenie wpływu zjawiska *embedment* na efektywność podsadzenia szczeliny. Związane jest to ze zmniejszeniem się wysokości szczeliny w_f , spadkiem przepuszczalności i przewodności wytworzonej szczeliny w złożu oraz w strefie ściany szczeliny. Przez cały czas, wraz ze wzrostem możliwości sprzętowych oraz oprogramowania komputerowego, są one unowocześniane, a tym samym pozwalają na lepsze odwzorowanie zjawiska *embedment*.

cylindrycznych rdzeni wyrównuje się oraz wygładza tak, aby z powierzchnią boczną tworzyły idealnie kąt prosty. Następnie określa się dla nich średnicę, długość oraz współczynnik przepuszczalności i porowatości.

Wyznaczenia chropowatości powierzchni ściany szczeliny [12]

Przed wciskaniem ziaren podsadzki w ścianę szczeliny należy wykonać zdjęcie pierwotnej powierzchni ściany szczeliny oraz określić jej chropowatość. Chropowatość wyznacza się pod mikroskopem stereoskopowym 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 3 [12] oraz przy pomocy równań (1) i (2) [12].



Rys. 3. Przykładowy profil chropowatości powierzchni wzdłuż odcinka pomiarowego dla wytypowanego obszaru na powierzchni czołowej ściany szczeliny [12]

Położenie średniej linii podziału profilu chropowatości musi spełniać warunek przedstawiony równaniami:

$$\sum_{i=0}^n A_{p_i} = \sum_{i=0}^n A_{v_i} \quad (1)$$

gdzie:

A_p – pole powierzchni pomiędzy krzywą szczytu a średnią linią podziału [mm^2],

A_v – pole powierzchni pomiędzy krzywą doliny a średnią linią podziału [mm²];

$$R = \frac{\sum_{i=0}^n H_{p_i} + \sum_{i=0}^n H_{v_i}}{n_p + n_v} \quad (2)$$

gdzie:

R – chropowość profilu powierzchni wzdłuż odcinka pomiarowego [μm],

H_p – wysokość szczytu [mm],

H_v – głębokość doliny [mm],

n_p – liczba wszystkich szczytów [-],

n_v – liczba wszystkich dolin [-].

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

Laboratoryjne zasymulowanie zjawiska wciskania ziaren materiału podsadzkowego w ściany szczeliny

W celu laboratoryjnego zasymulowania zjawiska wciskania ziaren materiału podsadzkowego w ściany szczeliny należy wytworzyć szczelinę wypełnioną podsadzką, a następnie poddać ją działaniu zadanego naprężenia ściskającego. Ilość materiału podsadzkowego potrzebną do wypełnienia szczeliny dla uzyskania zadanej koncentracji powierzchniowej określa się według równania (3) [23].

$$m_p = 0,1 \cdot A_{\text{śc.szczeliny}} \cdot C \quad (3)$$

gdzie:

m_p – masa podsadzki [g],

C – jednostkowe obciążenie wywierane przez materiał podsadzkowy (koncentracja powierzchniowa podsadzki) [kg/m²],

$A_{\text{śc.szczeliny}}$ – pole powierzchni ściany szczeliny poddawanej naprężeniu ściskającemu [cm²].

W przypadku zastosowania cylindrycznej komory do symulacji zjawiska *embedment*, przedstawionej na rysunku 8a, pole powierzchni ściany szczeliny $A_{\text{śc.szczeliny}}$ określa się według równania (4).

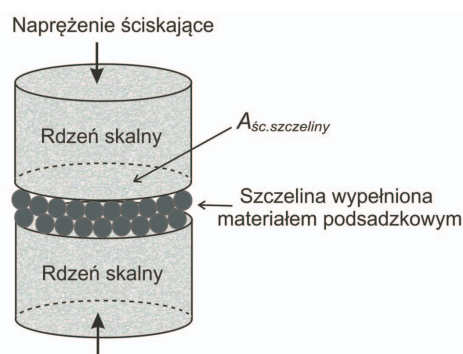
$$A_{\text{śc.szczeliny}} = \frac{\pi \cdot d_w^2}{4} \quad (4)$$

gdzie:

d_w – wewnętrzna średnica komory użytej do badań zjawiska wciskania ziaren w ścianę szczeliny [cm].

Następnie odważony materiał podsadzkowy m_p umieszcza się równoległe i równomiernie wewnątrz komory cylindrycznej

(rysunek 8a) pomiędzy dwiema powierzchniami czołowymi cylindrycznych rdzeni (rysunki 4 i 8b) o średnicy odpowiadającej wewnętrznej średnicy d_w komory cylindrycznej.



Rys. 4. Schemat umieszczenia materiału podsadzkowego w wytworzonej szczelinie podczas badania wciskania jego ziaren w ścianę szczeliny

Tak przygotowaną komorę zamyka się powoli tłokiem, a następnie umieszcza się na prasie hydraulicznej i podgrzewa do zadanej temperatury badania. Po uzyskaniu stałej temperatury w komorze rdzenie i podsadzkę poddaje się działaniu zadanego naprężenia ściskającego.

Siłę F_{tc} potrzebną do wytworzenia zadanego naprężenia ściskającego określa się według równania (5) [20, 21].

$$F_{tc} = \frac{\pi \cdot \sigma \cdot d_w^2}{4} \quad (5)$$

gdzie:

F_{tc} – siła potrzebna do uzyskania zadanego nacisku [N],

σ – naprężenie działające na skałę i podsadzkę [MPa],

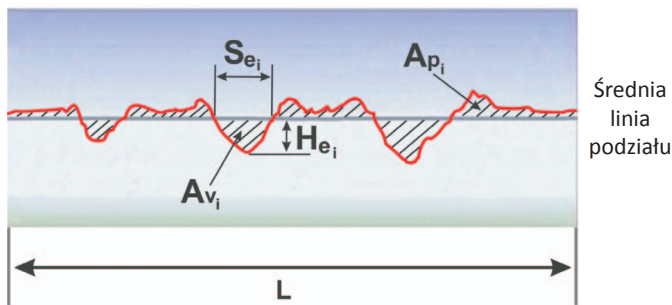
d_w – wewnętrzna średnica komory do badania wciskania ziaren w ścianę szczeliny [mm].

Do momentu uzyskania zadanej wartości naprężenia działającego na rdzenie i podsadzkę dochodzi się ze stałą prędkością ściskania. Po osiągnięciu zadanej wartości naprężenia ściskającego kontynuuje się nacisk na podsadzkę przez zadany okres czasu, a następnie powoli zdejmuje się naprężenie i tłok z komory.

Określenie całkowitej średniej głębokości wciskania się ziaren podsadzki w ściany szczeliny oraz całkowitego średniego procentowego uszkodzenia powierzchni ścian szczeliny, po upływie czasu oddziaływania zadanego naprężenia ściskającego

Głębokość wciskania się ziaren podsadzki w ścianę szczeliny wyznacza się pod mikroskopem stereoskopowym umożliwiającym cyfrowe obrazowanie oraz analizę głębokości i powierzchni wgniecenia. Polega to na wykonaniu cyfrowego obrazu powierzchni ściany szczeliny w 3D,

dla kilku wytypowanych na niej obszarów. Następnie dla każdego z nich wyznacza się średnią głębokość oraz średni procentowy rozmiar uszkodzenia z profili głębokości wzdłuż kilku odcinków pomiarowych (profilu głębokości). Metodę wyznaczenia głębokości wgniecia oraz ich procentowe uszkodzenie powierzchni szczeliny wzdłuż odcinka pomiarowego przedstawiono na rysunku 5 oraz przy pomocy równań (1), (6) i (7).



Rys. 5. Przykładowy profil głębokości wciskania się ziaren podsadzki wzdłuż odcinka pomiarowego dla wytypowanego obszaru na powierzchni ściany szczeliny

$$H_e = \frac{\sum_{i=0}^n H_{ei}}{n_e} \quad (6)$$

gdzie:

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

H_{ei} – głębokość doliny (wciskania się ziaren podsadzki w ścianę szczeliny) [mm],

n_e – liczba wszystkich dolin (wgniecia ziaren podsadzki w ścianę szczeliny) [-].

$$PS_e = \frac{\sum_{i=0}^n S_{ei}}{L} \cdot 100 \quad (7)$$

gdzie:

PS_e – procentowe uszkodzenie powierzchni ściany szczeliny (wgniecia ziaren podsadzki w ścianę szczeliny) dla profilu, wzdłuż odcinka pomiarowego [%],

S_{ei} – szerokość doliny (wgniecia ziaren podsadzki w ścianę szczeliny) [mm],

L – długość odcinka pomiarowego [mm].

Całkowitą średnią głębokość H_{ec} wciskania się ziaren podsadzki w ścianę szczeliny [mm] określa się według równania (8).

$$H_{ec} = H_{esr.g} + H_{esr.d} \quad (8)$$

gdzie:

$H_{esr.g}$ – średnia głębokość wciskania się ziaren podsadzki

w górną ścianę szczeliny, będąca średnią arytmetyczną uzyskanych wartości dla poszczególnych wytypowanych obszarów [mm],

$H_{esr.d}$ – średnia głębokość wciskania się ziaren podsadzki w dolną ścianę szczeliny, będąca średnią arytmetyczną uzyskanych wartości dla poszczególnych wytypowanych obszarów [mm].

Całkowite średnie procentowe uszkodzenie PS_{ec} powierzchni ściany szczeliny (wgniecia ziaren podsadzki w ścianę szczeliny) określa się według równania (9).

$$PS_{ec} = PS_{esr.g} + PS_{esr.d} \quad (9)$$

gdzie:

$PS_{esr.g}$ – średnie procentowe uszkodzenie powierzchni górnej ściany szczeliny (wgniecia ziaren podsadzki w ścianę szczeliny), będące średnią arytmetyczną uzyskanych wartości dla poszczególnych wytypowanych obszarów [%],

$PS_{esr.d}$ – średnie procentowe uszkodzenie powierzchni dolnej ściany szczeliny (wgniecia ziaren podsadzki w ścianę szczeliny), będące średnią arytmetyczną uzyskanych wartości dla poszczególnych wytypowanych obszarów [%].

Określenie wpływu zjawiska embedment na efektywność podsadzki wytworzonej szczeliny materiałem podsadzkowym

Wpływ zjawiska *embedment* na efektywną wysokość szczeliny wypełnionej materiałem podsadzkowym po działaniu naprężenia ściskającego można określić równaniami (10) i (11).

$$W_f = W_{fm} - H_{ec} \quad (10)$$

gdzie:

W_f – wysokość szczeliny wypełnionej materiałem podsadzkowym z uwzględnieniem zjawiska *embedment* [mm],

W_{fm} – wysokość szczeliny wypełnionej materiałem podsadzkowym bez występowania zjawiska *embedment* [mm],

H_{ec} – całkowita głębokość wciskania ziaren podsadzki w ścianę szczeliny [mm], wyznaczona według przedstawionej wcześniej procedury badawczej oraz równania (8).

Wysokość W_{fm} szczeliny wypełnionej materiałem podsadzkowym bez występowania zjawiska *embedment* określa się według wcześniej przedstawionej procedury badawczej. W badaniu tym zamiast rdzeni skalnych stosuje się rdzenie ze stali o wysokiej twardości, a prasę hydrauliczną należy dodatkowo wyposażyć w szczelinościomierz LVDT. Przez cały czas badania mierzy się wysokość W_{fm} szczeliny wy-

pełnionej materiałem podsadzkowym pomiędzy dwoma stalowymi rdzeniami za pomocą szczelinościomierza LVDT. We wskazaniach LVDT wysokości szczeliny należy uwzględnić wielkość odkształcenia stanowiska badawczego (tj. prasy hydraulicznej, komory pomiarowej oraz stalowych rdzeni).

$$PW_f = \frac{H_{ec}}{W_{fm}} \cdot 100 \quad (11)$$

gdzie:

PW_f – procentowy spadek wysokości szczeliny wypełnionej materiałem podsadzkowym z uwzględnieniem zjawiska *embedment* [%].

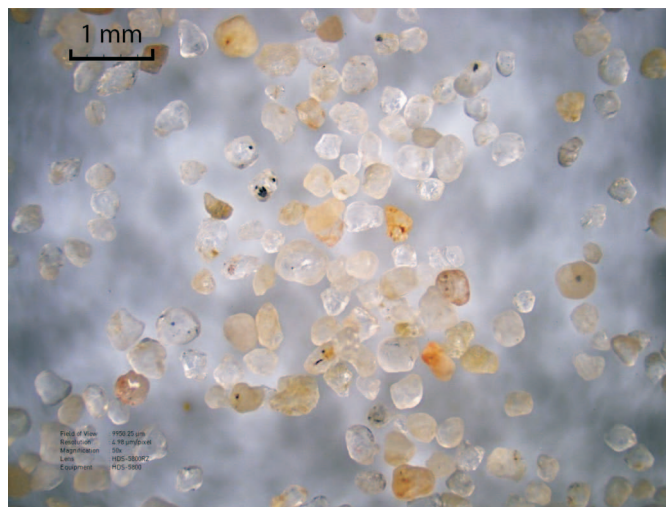
Charakterystyka skały złożowej, płynu szczelinującego oraz materiału podsadzkowego użytego do badań

Złoża niekonwencjonalne typu łupkowego *shale gas* występują w Polsce najczęściej na średnich głębokościach, rzędu 2000÷3500 m, gdzie panują naprężenia ściskające w zakresie 41,4÷69,0 MPa (6000÷10000 psi), a temperatura złożowa jest na poziomie 60÷100°C. Do badań wykorzystano skałę typu łupkowego, oznaczoną jako „łupek sylurski”, pochodzącą z polskiego złoża. Posiadała ona w swoim ilościowym składzie mineralogicznym między innymi: 24,4% kwarcu, 14,2% węglanów oraz 47,7% minerałów ilastych.

Znaczną ilość zabiegów w skałach łupkowych przeprowadza się z użyciem cieczy nieagresywnej o niskiej lepkości. Do badań użyto płynu szczelinującego o składzie: woda wodociągowa + 0,01% biocydu + 0,2% środka (stabilizator) zapobiegającego pęcznieniu minerałów ilastych i łupkowych oraz zapobiegającego migracji minerałów ilastych + 0,2% mikroemulsji + 0,8 g/l środka ograniczającego opory przepływu (poliakryloamid).

Do podsadzenia szczeliny została wykorzystana podsadzka o rozmiarze ziaren 0,425÷0,212 mm (40÷70 mesh). Pierwszą

z nich była podsadzka kwarcowa, oznaczona jako „podsadzka kwarcowa 40/70” (rysunek 6). Głównym jej składnikiem jest piasek kwarcowy (99,0% kwarcu).

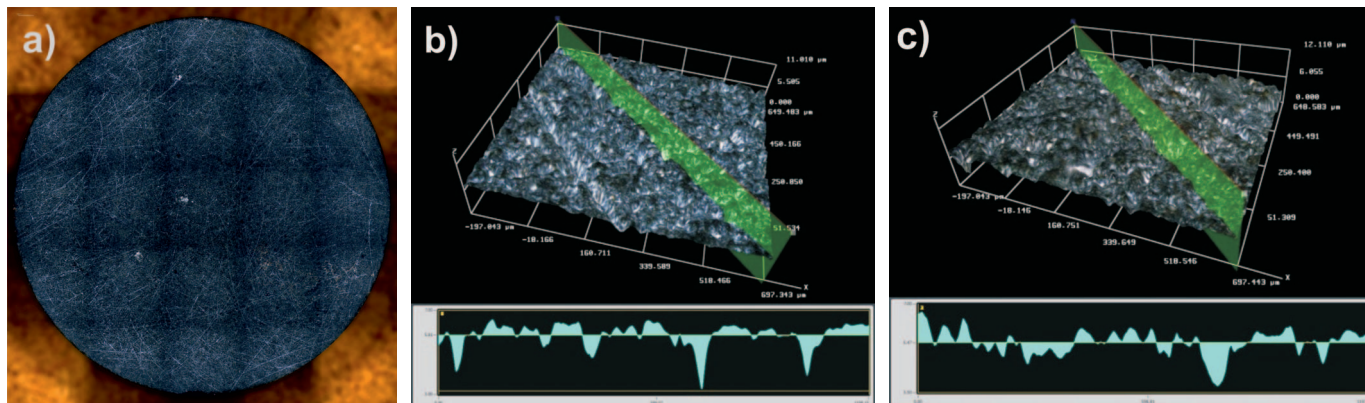


Rys. 6. Wygląd ziaren „podsadzki kwarcowej 40/70”

Wykonanie badań laboratoryjnych zjawiska wciskania ziaren podsadzki w ściany szczeliny

Badania wykonano na rdzeniach cylindrycznych o średnicy 2,54 cm (1 cala). Były one wycięte z rdzeni wiertniczych według procedury badawczej opisanej we wcześniejszej części artykułu. Przepuszczalność rdzenia oznaczonego jako „łupek sylurski”, pochodzącego z polskiego złoża, osiągnęła wartość poniżej 0,001 mD.

W pierwszej kolejności wyznaczono średnią pierwotną chropowatość powierzchni czołowej rdzenia (ściany szczeliny), przedstawionego na rysunku 7, według procedury badawczej opisanej we wcześniejszej części artykułu. Była ona wyznaczana jako średnia arytmetyczna z dwóch wytypowanych obszarów (rysunki 7b i 7c) na powierzchni czołowej



Rys. 7. Określenie pierwotnej chropowatości (3D) powierzchni ścian szczeliny dla skały łupkowej pochodzącej z polskiego złoża: a) powierzchnia czołowa rdzenia, b) obszar nr 1, c) obszar nr 2

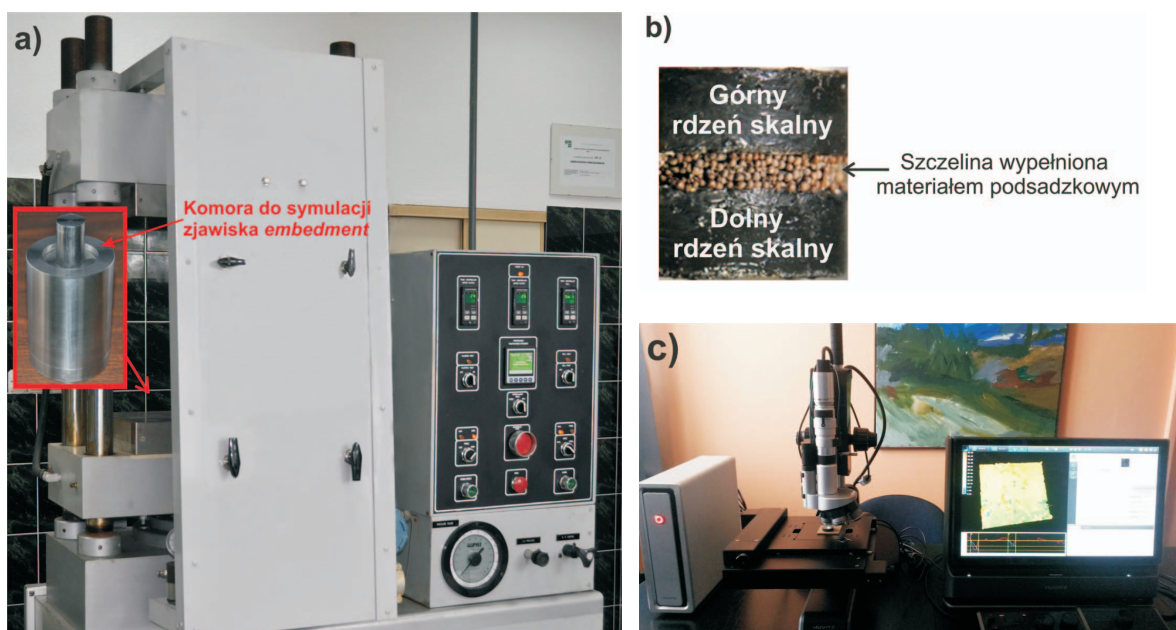
badanego rdzenia (rysunek 7a), z jednego profilu biegnącego w poprzek badanego obszaru. Badania te wykonano pod mikroskopem stereoskopowym przedstawionym na rysunku 8c.

Średnia chropowatość R_{sr} dla całej powierzchni czołowej rdzenia (ściany szczeliny) wyniosła $0,00047 \pm 0,00006$ [mm].

Następnie wykonano laboratoryjną symulację zjawiska wciskania ziaren podsadzki w ściany szczeliny dla: podsadzki kwarcowej, jednej koncentracji powierzchniowej podsadzki $0,98 \text{ kg/m}^2$ (tj. $0,2 \text{ lb/ft}^2$), jednej wartości naprężenia ściskającego $41,4 \text{ MPa}$ (tj. 6000 psi), okresu 6 godzin oddziaływania naprężenia ściskającego oraz suchych i dodatkowo nasycanych płynem szczelinującym rdzeni, w temperaturze pokojowej. Badania wykonano na prasie hydraulicznej wyposażonej w szczelinościomierz LVDT (rysunek 8a), według procedury badawczej przedstawionej w niniejszym artykule. Podsadzkę umieszczono pomiędzy dwoma cylindrycznymi rdzeniami (rysunek 8b) w komorze do symulacji zjawiska *embedment* (rysunek 8a) i poddawano działaniu naprę-

żenia ściskającego przez okres 6 godzin. Po upływie zadanego czasu zdejmowano naprężenie, rozkręcano komorę i badano powierzchnie czołowe cylindrycznych rdzeni (ściany szczeliny) pod mikroskopem stereoskopowym, przedstawionym na rysunku 8c. Całkowitą średnią głębokość wciskania ziaren podsadzki w ściany szczeliny wyznaczano z czterech odcinków pomiarowych dla dwóch obszarów, wytypowanych na powierzchni czołowej górnego oraz dolnego rdzenia (ściany szczeliny). Dodatkowo wykonano badania wysokości szczeliny pomiędzy dwoma cylindrycznymi rdzeniami stalowymi o wysokiej twardości (bez występowania zjawiska *embedment*).

Parametry zestawów rdzeni oraz warunki wykonania testów przedstawiono w tablicach 1 i 2, natomiast wyniki badań całkowitych średnich głębokości wciskania ziaren podsadzki w ściany szczeliny pokazano na rysunkach nr 9, 10 i 11. Dla każdego badanego obszaru wyznaczono cztery odcinki pomiarowe.



Rys. 8. Wygląd: a) prasy hydraulicznej wraz z komorą o średnicy wewnętrznej 2,54 cm (tj. 1 cala) do wciskania ziaren materiału podsadzkowego w ścianę szczeliny w INiG – PIB Oddz. Krosno, b) schematu umieszczenia materiału podsadzkowego w szczelinie podczas badania wciskania jego ziaren w ścianę szczeliny, c) mikroskopu stereoskopowego Huvitz, znajdującego się w firmie CONBEST, w Krakowie

Tablica 1. Parametry zestawów rdzeni użytych w testach

Nr testu	Nazwa rdzeni	Rdzeń	Długość rdzenia [mm]	Średnica rdzenia [mm]
1	Rdzenie stalowe o wysokiej twardości	górnny	10,00	25,40
		dolny	10,00	25,40
2	Skała typu łupkowego, suche rdzenie	górnny	4,41	25,40
		dolny	5,44	25,45
3	Skała typu łupkowego, rdzenie wcześniej nasycane płynem szczelinującym przez okres 24 godz.	górnny	3,50	25,49
		dolny	5,97	25,42

Tablica 2. Warunki wykonania testów

Rodzaj materiału podsadzkowego	„Podsadzka kwarcowa 40/70”
Koncentracja powierzchniowa podsadzki [kg/m ²]	0,98 (tj. 0,2 lb/ft ²)
Temperatura podczas testu [°C]	pokojowa
Zadane naprężenie ściskające [MPa]	41,4 (tj. 6000 psi)
Czas działania zadanego naprężenia ściskającego [godz.]	6

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

Niepewność oszacowanej całkowitej średniej głębokości

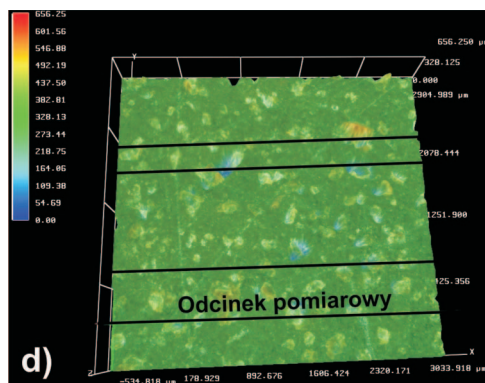
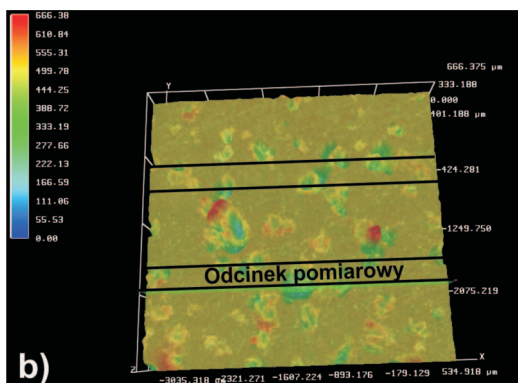
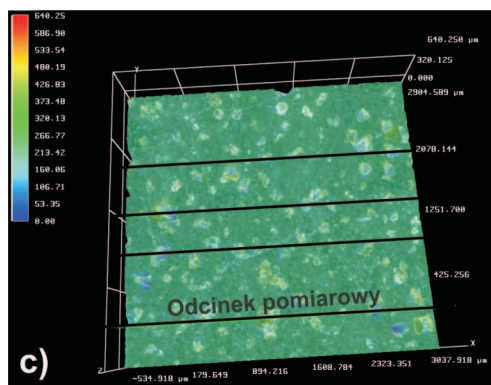
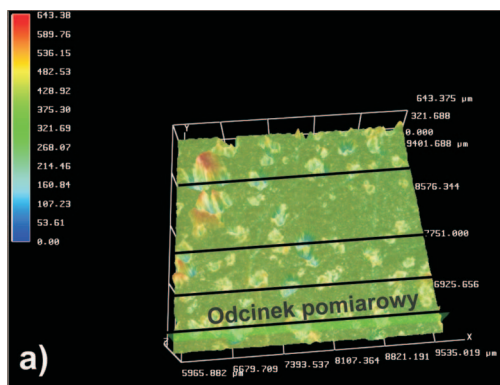
wciskania ziaren materiału podsadzkowego w ściany szczeliny wyznaczono na podstawie odchylenia standardowego od wartości średniej, które dla poszczególnych profili nie przekraczało 0,042 mm.



Wygląd powierzchni czołowej rdzenia (ściany szczeliny)



Wygląd powierzchni czołowej rdzenia (ściany szczeliny)

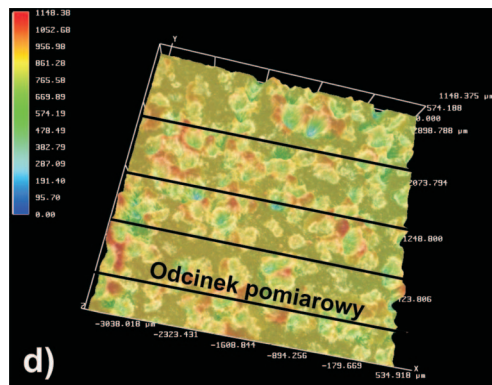
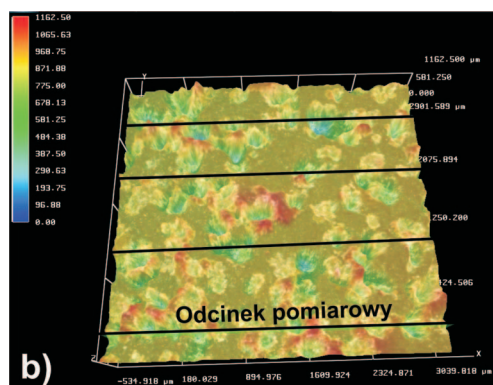
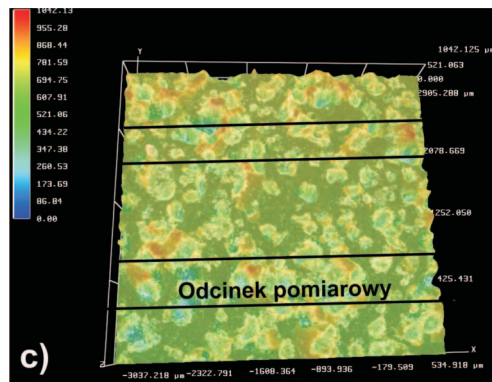
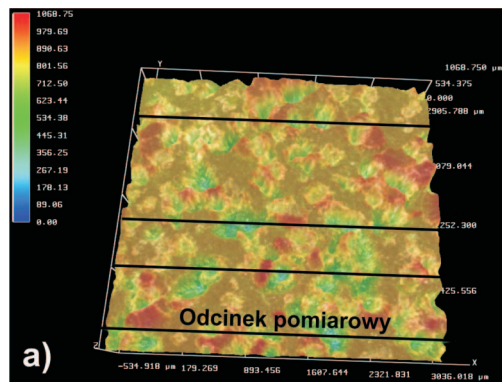


Rys. 9. Określenie średniej głębokości wciskania ziaren podsadzki w ściany szczeliny oraz średniego procentowego uszkodzenia powierzchni szczeliny w teście nr 2, dla górnego rdzenia: a) obszar nr 1, b) obszar nr 2, oraz dla dolnego rdzenia: c) obszar nr 1, d) obszar nr 2

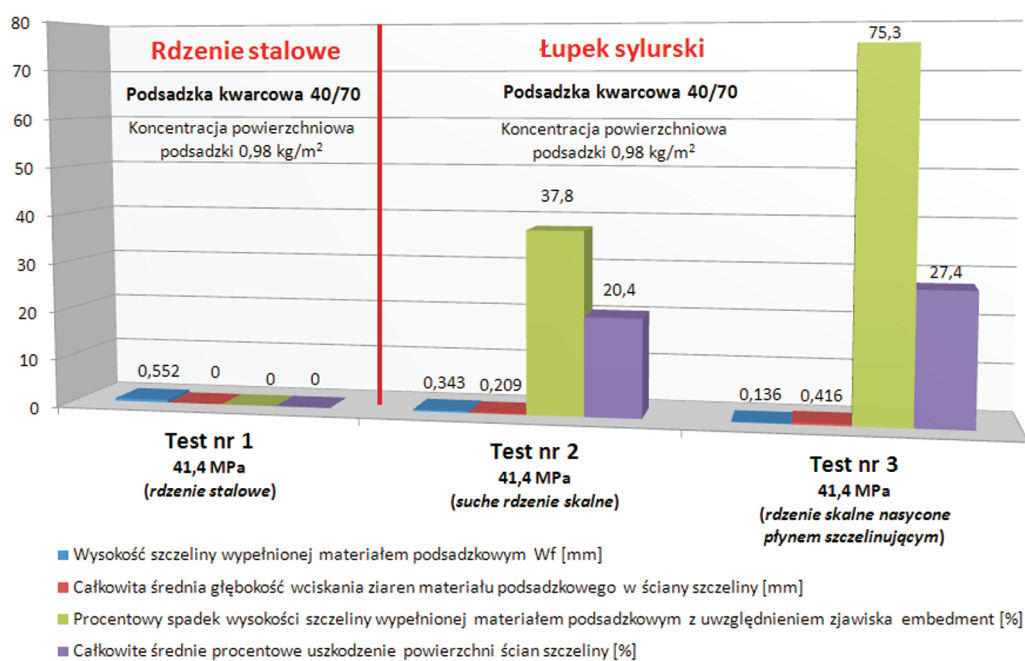


Wygląd powierzchni czołowej rdzenia (ściany szczeliny)

Wygląd powierzchni czołowej rdzenia (ściany szczeliny)



Rys. 10. Określenie średniej głębokości wciskania ziaren podsadzki w ściany szczeliny oraz średniego procentowego uszkodzenia powierzchni szczeliny w teście nr 3, dla górnego rdzenia: a) obszar nr 1, b) obszar nr 2, oraz dla dolnego rdzenia: c) obszar nr 1, d) obszar nr 2



Rys. 11. Przedstawienie efektywności podsadzenia wytworzonej szczeliny materiałem podsadzkowym dla „łupka sylurskiego”

Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono wpływ zjawiska wciskania ziaren materiału podsadzkowego w ściany szczeliny na jej efektywne podsadzenie. W pierwszej kolejności została wyznaczona wysokość szczeliny wypełnionej podsadzką pomiędzy dwoma rdzeniami stalowymi o wysokiej twardości. Obrazowało to maksymalną wysokość szczeliny możliwą do uzyskania przy zadanym naprężeniu ściskającym, bez występowania zjawiska *embedment*. Dla zestawu z rdzeni stalowych o wysokiej twardości, po 6 godzinach oddziaływania naprężenia ściskającego rzędu 41,4 MPa (tj. 6000 psi), uzyskano szczelinę o wysokości 0,552 mm. Koncentracja powierzchniowa podsadzki, oznaczonej jako „podsadzka kwarcowa 40/70”, wynosiła 0,98 kg/m². Niska jej wartość ma miejsce podczas tworzenia się systemu licznych szczelin, mikropeknięć w złożach typu łupkowego *shale gas*.

Następnie dla zestawu składającego się z suchych cylindrycznych rdzeni skalnych „łupka sylurskiego” (bez kontaktu skały z płynem szczelinującym), po 6 godzinach oddziaływania naprężenia ściskającego rzędu 41,4 MPa (tj. 6000 psi), uzyskano szczelinę o wysokości 0,343 mm. Koncentracja powierzchniowa „podsadzki kwarcowej 40/70” wynosiła 0,98 kg/m². Całkowita średnia głębokość wciskania się ziaren podsadzki o rozmiarze 0,425÷0,212 mm w ściany szczeliny wyniosła 0,209 mm. W tym przypadku nastąpiło zmniejszenie wysokości szczeliny o 37,8% w stosunku do maksymalnej wysokości szczeliny wyznaczonej bez występowania

zjawiska *embedment* (tj. 0,552 mm). Na podstawie uzyskanego wyniku można stwierdzić, iż badana skała (bez kontaktu z płynem szczelinującym) charakteryzuje się dobrymi właściwościami, umożliwiającymi efektywne podsadzenie wytworzonej szczeliny dla naprężenia ściskającego 41,4 MPa (przy zastosowaniu niskiej koncentracji powierzchniowej „podsadzki kwarcowej 40/70”, równej 0,98 kg/m²).

W przypadku zestawu cylindrycznych rdzeni skalnych „łupka sylurskiego”, dodatkowo nasyconych przez okres 24 godzin płynem szczelinującym (na bazie poliakryloamidu), zaobserwowano znaczny wzrost całkowitej średniej głębokości wciskania ziaren podsadzki w ściany szczeliny, wynoszący 0,416 mm. W wyniku tego zjawiska następuje zmniejszenie wysokości szczeliny o 75,3% w stosunku do jej maksymalnej wysokości. Tym samym wysokość szczeliny po 6-godzinnym oddziaływaniu naprężenia ściskającego wyniosła 0,136 mm. Na podstawie uzyskanego wyniku można stwierdzić, że badana skała (nasycona płynem szczelinującym) charakteryzuje się średnimi właściwościami umożliwiającymi efektywne podsadzenie wytworzonej szczeliny dla naprężenia ściskającego 41,4 MPa (przy zastosowaniu niskiej koncentracji powierzchniowej „podsadzki kwarcowej 40/70”, równej 0,98 kg/m²).

Otrzymane wyniki badań mogą stanowić jedną z metod oceny efektywności podsadzenia szczeliny, co wpływa na produkcję gazu po zabiegu hydraulicznego szczelinowania.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2015, nr 7, s. 461–471

Artykuł nadesłano do Redakcji 9.12.2014 r. Zatwierdzono do druku 16.02.2015 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 archiwalny: DK-4100-20/14; nr zlecenia: 0020/KS/14.

Literatura

- [1] Akrad O., Miskimins J., Prasad M.: *The Effects of Fracturing Fluids Rock Mechanical Properties and Proppant Embedment*. SPE 146658, 2011.
- [2] Alramahi B., Sundberg M. I.: *Proppant Embedment and Conductivity of Hydraulic Fractures in Shales*. ARMA 2012, 12–291.
- [3] Chong K. K., Grieser W. V., Passman A., Tamayo C. H., Modeland N., Burke B.: *A completions Guide Book to Shale-Play Development: A Review of Successful Approaches Towards Shale-Play Stimulation in the Last Two Decades*. CSUG/SPE 2010, 133874.
- [4] Czupski M., Kasza P., Wilk K.: *Płyny do szczelinowania złożeń niekonwencjonalnych*. Nafta-Gaz 2013, nr 1, s. 42–50.
- [5] Economides M. J., Nolte K. G.: *Reservoir: Stimulation*. Schlumberger Educational Services, Houston, Texas, 2nd edition. 1989.
- [6] 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.
- [7] Gidley J. L., Holditch S. A., Nierode D. A., Veatch R. V.: *Recent Advances in Hydraulic Fracturing*. SPE 1989.
- [8] Guo J., Liu Y.: *Modeling of Proppant Embedment: Elastic Deformation and Creep Deformation*. SPE 2012, 157449.
- [9] Kasza P.: *Zabiegi stymulacji wydobywania w niekonwencjonalnych złożach węglowodorów*. Nafta-Gaz 2011, nr 10, s. 697–701.
- [10] Legarth B., Huenges E., Zimmermann G.: *Hydraulic fracturing in a sedimentary geothermal reservoir: Results and implications*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 2005, 42, pp. 1028–1041.
- [11] Masłowski M.: *Materiały podsadzkowe do zabiegów hydraulicznego szczelinowania złożeń niekonwencjonalnych*. Nafta-Gaz 2014, nr 2, s. 75–86.
- [12] 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.

- [13] Palisch T., Vincent M. C., Handren P. J.: *Slickwater Fracturing – food for thought*. SPE 2008, 115766.
- [14] 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, 29.06–1.07.2006, Switzerland.
- [15] 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, 70, pp. 107–117.
- [16] Sato K., Ichikawa M.: *Post-Frac analysis indicating multiple fractures created in a volcanic formation*. SPE 1998, paper 39513. Proceedings SPE India oil and gas conference and exhibition, New Delhi 1998.
- [17] 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 2013, 166505.
- [18] Terracina J. M., Turner J. M., Collins D. H., Spillars S. E.: *Proppant Selection and Its Effect on the Results of Fracturing Treatments Performed in Shale Formations*. SPE 2010, 135502.
- [19] Volk L. J., Raible C. J., Carrol H. B., Spears J. S.: *Embedment of high strength proppant into low-permeability reservoir rock*. SPE/DOE 1981, 9867.
- *Part 2: Measurement of properties of proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations, Annex A – Formazin solution preparation*. First edition, 01.11.2006.
- [21] International Standard ISO 13503-2:2006/Amd.1:2009(E) *Petroleum and natural gas industries – Completion fluids and materials – Part 2: Measurement of properties of proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations, AMENDMENT 1: Addition of Annex B: Proppant specification*. 01.11.2009.
- [22] Polska norma PN-EN ISO 13503-2 *Przemysł naftowy i gazowniczy – Płyny i materiały do dowiercania złóż – Część 2: Pomiary właściwości materiałów podsadzkowych używanych podczas zabiegów hydraulicznego szczelinowania oraz wykonywania obsypki żwirowej (ISO 13503-2:2006)*. Polski Komitet Normalizacyjny. Warszawa, styczeń 2010.
- [23] Polska norma PN-EN ISO 13503-5: *Przemysł naftowy i gazowniczy – Materiały i płyny do dowiercania złóż – Część 5: Procedury pomiaru długotrwałej przewodności materiałów podsadzkowych (ISO 13503-5:2006)*. Polski Komitet Normalizacyjny. Warszawa, wrzesień 2009.

Akty prawne i normatywne

- [20] International Standard ISO 13503-2:2006(E) *Petroleum and natural gas industries – Completion fluids and materials*



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

OFERTA

ZAKŁAD STYMULACJI WYDOBYCIA WĘGLOWODORÓW

Zakres działania:

- przygotowywanie receptur i badania płynów zabiegowych do stymulacji wydobywania ropy i gazu;
- symulacje przepływów i badania reologiczne w skali półtechnicznej;
- badania materiałów podsadzkowych;
- badania przewodności szczeliny w zależności od użytego materiału podsadzkowego i płynu zabiegowego;
- symulacje usuwania uszkodzenia strefy przyodwiertowej;
- oznaczanie współczynnika przepuszczalności i porowatości skał, kamienia cementowego, betonu itp.;
- dobór środków regulujących właściwości reologiczne płynów (SPCz, polimery itp.);
- badania szybkości reakcji skał złożowych z cieczami kwasującymi;
- laboratoryjne symulacje zabiegów kwasowania w warunkach złożowych;
- wykonywanie projektów technologicznych zabiegów stymulacji;
- analiza testów miniszczelinowania i analiza pozabiegowa;
- laboratoryjne symulacje metod wspomagających wydobywanie węglowodorów;
- badania zjawisk korozyjnych występujących w górnictwie naftowym;
- dobór ochrony inhibitorowej zapobiegającej zjawiskom korozyjnym.



Kierownik: dr inż. Piotr Kasza
Adres: ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno
Telefon: 13 436-89-41 w. 5229
Faks: 13 436-79-71
E-mail: piotr.kasza@inig.pl

