

Mateusz Masłowski

Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

## Materiały podsadzkowe do zabiegów hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych

W artykule została przedstawiona technologia *slickwater fracturing*, która jest najczęściej wykorzystywaną metodą tworzenia systemu licznych szczelin i spękań w złożach niekonwencjonalnych. Scharakteryzowano trzy rodzaje materiałów podsadzkowych stosowanych do wypełnienia szczeliny: piasek kwarcowy, materiał ceramiczny oraz piasek kwarcowy pokryty żywicą. Następnie, po przeglądnięciu literatury oraz norm dotyczących właściwości materiałów podsadzkowych, przedstawiono sposób właściwego doboru materiałów podsadzkowych do zabiegów szczelinowania złóż niekonwencjonalnych. Zbadano przewodność i przepuszczalność materiału podsadzkowego w zasymulowanej szczelinie w warunkach laboratoryjnych.

Słowa kluczowe: materiał podsadzkowy, przewodność podsadzki, zabieg hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych.

### Proppant material for hydraulic fracturing in unconventional reservoirs

This article presents the slickwater fracturing technology – most commonly used to create a system of numerous fractures in unconventional reservoirs. Three types of proppant material used to fill the fractures were characterized: quartz sand, ceramic proppant and quartz sand coated with resin. After reviewing the literature and recommended practices for evaluating proppant test parameters, the proper selection of fracturing proppants for unconventional resources were presented. The proppant pack conductivity and permeability in the simulated fracture were examined in laboratory conditions.

Key words: proppant material, conductivity of the proppant, hydraulic fracturing in unconventional reservoirs.

### Wstęp

Wydobycie węglowodorów ze złóż niekonwencjonalnych jest stosunkowo nową gałęzią przemysłu naftowego. Złoża niekonwencjonalne to między innymi [4]: złoża typu zamkniętego (*tight gas*) oraz formacje łupkowe (*shale gas*). Eksploatacja ich jest ekonomiczna jedynie po wykonaniu wielu zabiegów stymulacji wydobywania, prowadzących do uzyskania w skale systemu licznych szczelin i spękań. Przepływ gazu ze złoża do odwiertu przez wytworzone szczeliny i spękania jest uwarunkowany odpowiednim ich podparciem, do czego służą różnego rodzaju materiały podsadzkowe. Należą do nich między innymi: podsadzki kwarcowe, podsadzki ceramiczne, jak również podsadzki pokryte powłoką z żywicy. Właściwości podsadzek

stosowanych do zabiegów szczelinowania złóż niekonwencjonalnych różnią się od materiałów podsadzkowych używanych w złożach konwencjonalnych. Związane jest to między innymi z ich niskim ciężarem właściwym, wysoką odpornością na naprężenia ściskające występujące w złożu oraz przewodnością podsadzonych szczelin o bardzo małej rozwarości. Właściwy dobór rodzaju materiału podsadzkowego jest również uzależniony od technologii tworzenia szczelin i spękań oraz od transportu podsadzki w wygenerowanych szczelinach. Przed zastosowaniem materiału podsadzkowego w warunkach otworowych należy określić jego właściwości i parametry, według odpowiednich norm i procedur.

## Podsadzanie wygenerowanych szczelin za pomocą materiału podsadzkowego

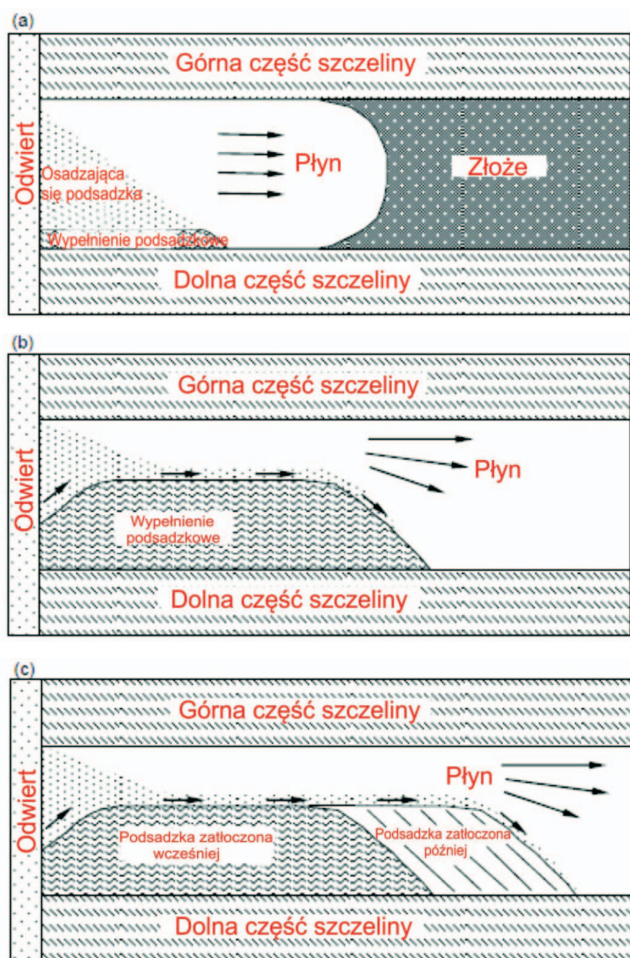
Aby zabiegi stymulacyjne w formacjach łupkowych były skuteczne, należy wytworzyć w łupkach system licznych szczelin, mikropęknięć umożliwiających uwolnienie się zaadsorbowanego gazu oraz przepływ płynów złożowych z sieci porów do odwiertu [11]. Taka sieć szczelin pozwoli na uzyskanie dużej powierzchni kontaktu złoża z odwiertem. Znaczną liczbę zabiegów w łupkach kruchych przeprowadza się z użyciem cieczy nieagresywnej o bardzo niskiej lepkości, nieprzekraczającej 10 cP. Technologia ta nosi nazwę *slickwater fracturing* [4, 11]. Płynem szczelinującym jest tutaj woda z bardzo małym dodatkiem środków chemicznych, w tym przede wszystkim poliakryloamidu (w ilości nieprzekraczającej 1%) lub naturalnego polimeru liniowego (w ilości 0,6÷1,2 kg/m<sup>3</sup>). Stosowanie obniżonej koncentracji polimeru oraz rezygnacja z technologii sieciowania polimeru liniowego wiążą się z koniecznością zatłaczania znacznej ilości wody (tysiące m<sup>3</sup>) oraz stosowania dużych wydajności tłoczenia, dochodzących nawet do 25 m<sup>3</sup>/min. Spowodowane jest to koniecznością osiągnięcia ciśnienia większego od ciśnienia szczelinowania, utrzymania propagacji szczeliny oraz transportu materiału podsadzkowego do szczeliny. Zapewni to uzyskanie opłacalnej ekonomicznie produkcji ze złóż o małej przepuszczalności i dużej miąższości [4, 12]. Geometria utworzonych szczelin w formacjach łupkowych jest bardzo złożona i zależna od obszarów zdolnych do pęknięcia.

Wygenerowane w złożu liczne szczeliny należy zabezpieczyć przed ich całkowitym zaciśnięciem po zakończeniu zabiegu. W celu zapewnienia przepływu gazu i płynów złożowych do odwiertu konieczne jest uzyskanie odpowiedniej przewodności i przepuszczalności szczelin. Wykorzystuje się do tego materiał podsadzkowy *proppant*. Transportuje się go z powierzchni odwiertu, przez armaturę otworową i perforację, a następnie wypełnia się wygenerowany system bardzo wąskich szczelin przy użyciu cieczy o niskiej lepkości, poniżej 10 cP. Technologia *slickwater fracturing* charakteryzuje się stosowaniem materiału podsadzkowego o małej granulacji ziaren, rzędu 600÷300 μm (30÷50 mesh) lub mniejszej. W przypadku złóż niekonwencjonalnych w pierwszej kolejności zatłacza się podsadzkę o bardzo małej granulacji ziaren, rzędu 150 μm (100 mesh) lub 212÷106 μm (70÷140 mesh). Mają one za zadanie oczyścić odwiert i otwory perforacyjne oraz ograniczyć filtrację płynu szczelinującego w ściany tworzących się szczelin i spękań. Pozwala to na generację systemu szczelin o dużym zasięgu. Natomiast tzw. podsadzka główna najczęściej charakteryzuje się granulacją ziaren w przedziale od 425÷212 μm (40÷70 mesh) do 600÷300 μm (30÷50 mesh). Ma ona za zadanie zabezpieczyć szczelinę przed jej całkowitym zamknięciem, a tym samym zapewnić

jej właściwą przewodność dla przepływu medium złożowego do odwiertu. Szczeliny generowane w najbliższym kontakcie z odwiertem, to jest na początku tworzenia się systemu szczelin, podsadza się podsadzką o większej granulacji od stosowanej głównej podsadzki. Najczęściej jest to podsadzka o granulacji ziaren 600÷300 μm (30÷50 mesh). Czasami też stosuje się granulację ziaren 850÷425 μm (20÷40 mesh). Pozwala to na uzyskanie po zakończeniu zabiegu dużej rozwarości, a tym samym większej przewodności szczeliny przy samym odwiercie. Zabezpiecza to również przed znacznym spadkiem jej przewodności przy odwiercie w wyniku przemieszczania się różnych zanieczyszczeń, skruszonej podsadzki oraz mniejszych ziaren podsadzki z systemu szczelin w kierunku odwiertu podczas eksploatacji złoża.

Koncentracja podsadzki dodawanej do płynu szczelinującego jest zdecydowanie mniejsza, niż ma to miejsce w przypadku złóż konwencjonalnych, i wynosi najczęściej ok. 30÷120 kg/m<sup>3</sup>, a czasami może dochodzić do 360 kg/m<sup>3</sup>. Natomiast ilość podsadzki oraz wydajność jej tłoczenia do złoża niekonwencjonalnego są zdecydowanie większe. Ilość zatłaczanej podsadzki podczas jednego zabiegu przekracza 100 ton, a całkowita ilość zatłoczona do złoża może przekraczać nawet 1000 ton. Wydajność zatłaczania płynu szczelinującego wraz z podsadzką do odwiertu jest duża i przekracza nawet 25 m<sup>3</sup>/min [4]. W wyniku tego mamy do czynienia z warunkami przepływu burzliwego w odwiercie. Sprzyja to utrzymaniu podsadzki w formie zawieszony w płynie szczelinującym o małej lepkości. Liczne dane eksperymentalne wykazały jednak, że podsadzka może wytrącać się z płynu zaraz po przejściu przez perforację i wejściu do szczeliny (zjawisko sedymentacji) w wyniku zmniejszenia szybkości przepływu i działania siły ciężkości. Powoduje to osadzanie się jej na dnie szczeliny i tworzenie tzw. *banku* w pobliżu odwiertu (rysunek 1a) [4, 7, 11]. Podczas trwania zabiegu *bank* będzie zwiększał swoją wysokość – aż do osiągnięcia stanu równowagi (rysunek 1b), w którym cały pozostały materiał podsadzkowy będzie bardziej efektywnie przenoszony i osadzany na końcu *banku* (rysunek 1c) [4, 7, 11]. Eksperymenty wykazały ponadto, że podsadzka wprowadzana na początku zabiegu układa się najbliżej odwiertu, z kolei podsadzka wtłoczona na końcu zabiegu będzie osadzać się na najdalszym końcu szczeliny, z dala od odwiertu. To osadzanie podsadzki w *banku* będzie sprzyjało również tworzeniu najwyższej możliwej koncentracji wypełnienia podsadzkowego (*bed*) dla rozwarości szczeliny tworzonej przez *slickwater* [4, 7].

Wytworzony w złożu niekonwencjonalnym system szczelin o niskiej przewodności może być równie efektywny jak szczelina o wysokiej przewodności w złożu konwencjonalnym



Rys. 1. Sposób układania się podsadzki podczas zabiegu *slickwater fracturing* według teorii Kernsa [4, 7]

z dużym uszkodzeniem. Dodatkowe badania laboratoryjne i terenowe z użyciem znaczników promieniotwórczych wykazały, że zasięg transportu 150-mikrometrowego (100 mesh) materiału podsadzkowego w szczelinie wynosi do 400 metrów, a materiału podsadzkowego o granulacji  $425\div 212\ \mu\text{m}$  ( $40\div 70$  mesh) – ok. 170 metrów [11].

W trakcie podsadzania systemu szczelin w złożach typu łupkowego materiał podsadzkowy może generować przewodność szczeliny na trzy różne sposoby [11]:

- podsadzka może układać się wielowarstwowo (jak przy klasycznym szczelinowaniu) – zachodzi to tylko w obszarze tworzenia się *banku*,
- podsadzka może zawieszać się oraz blokować w przewężeniach szczelin i mikroszczelin,
- trzecim możliwym sposobem ułożenia podsadzki w szczelinie jest utworzenie częściowej, pojedynczej warstwy.

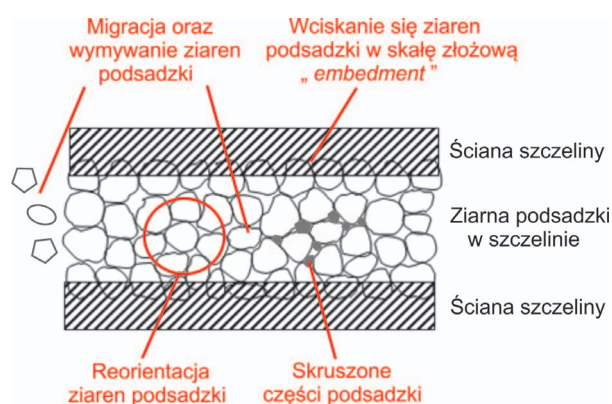
### Charakterystyka materiałów podsadzkowych stosowanych do zabiegów hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych

Do podstawowych materiałów podsadzkowych stosowanych do zabiegów stymulacyjnych na złożach niekonwencjo-

nalnych oprócz sposobu transportu i umieszczenia podsadzki w szczelinie na przewodność wygenerowanego systemu szczelin w złożu niekonwencjonalnym w znacznym stopniu wpływają również zjawiska (rysunek 2) [6]:

- wciskania się ziaren podsadzki w ścianę szczeliny (*embedment*);
- reorientacji ziaren podsadzki w szczelinie;
- kruszenia (pęknięcia) ziaren podsadzki wywołane występującymi w złożu naprężeniami ściskającymi;
- wymywania ziaren podsadzki ze szczeliny podczas powrotu płynu szczelinującego do odwiertu (*flowback*).

Powyższe zjawiska występują głównie podczas zaciskania szczeliny (po zakończeniu zabiegu) oraz podczas późniejszej eksploatacji złoża.



Rys. 2. Przedstawienie zjawisk wpływających na przewodność podsadzonej szczeliny po zakończeniu zabiegu *slickwater fracturing* [6]

W technologii *slickwater fracturing* rozwarłość wytworzonych szczelin jest bardzo mała [12], powodem może być szybkie zamknięcie szczeliny po zabiegu. Zaprojektowanie zabiegu w formacjach łupkowych jest bardzo trudne, gdyż stosowane klasyczne modele propagacji szczeliny (PKN) i symulatory do projektowania zabiegów na złożach konwencjonalnych nie mają zastosowania w przypadku złóż niekonwencjonalnych. Modele opisujące skomplikowany system szczelin i spękań w złożach niekonwencjonalnych oraz odpowiednie oprogramowanie do projektowania i analizy tego typu zabiegów są dopiero tworzone. Przy czym należy zaznaczyć, że modele dla formacji łupkowych występujących w Polsce (średnie głębokości, rzędu  $2000\div 3500$  m) mogą się znacznie różnić od modeli opracowywanych dla złóż niekonwencjonalnych w USA (małe głębokości, rzędu  $900\div 2000$  m).

nalnych zalicza się: materiał kwarcowy, materiał ceramiczny oraz materiał dodatkowo pokryty żywicą.

Do grupy materiałów kwarcowych należy naturalny piasek. Głównym jego składnikiem jest krystaliczna krzemionka (kwarc)  $\text{SiO}_2$ , stanowiąca ok. 80÷99,8% podsadzki. Wydobywa się go metodą odkrywkową. Następnie ziarna piasku są przesiewane, segregowane i mieszane we właściwych proporcjach w celu uzyskania podsadzki o odpowiednich własnościach i znormalizowanej granulacji. Gęstość nasypowa stosowanych podsadzek kwarcowych wynosi ok.  $1,50 \text{ g/cm}^3$ , natomiast gęstość pozorną (ciężar właściwy) ok.  $2,60 \text{ g/cm}^3$ . Charakteryzują się one niewielką wytrzymałością na naprężenia ściskające (kruszenie), a tym samym najczęściej stosowane są na małych głębokościach, gdzie naprężenia te nie przekraczają  $41,4 \text{ MPa}$  ( $6000 \text{ psi}$ ) [2]. Zaletą stosowania podsadzek kwarcowych jest łatwy dostęp oraz zdecydowanie niższy koszt produkcji w stosunku do następczej omawianej grupy – podsadzek ceramicznych.

Materiały ceramiczne charakteryzują się różną zawartością tlenku glinu,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . W przypadku szczelinowania złóż konwencjonalnych stosuje się podsadzkę na bazie spiekane-go boksytu, który cechuje duży ciężar właściwy, rzędu ok.  $3,50 \text{ g/cm}^3$ , oraz duża wytrzymałość na naprężenia ściskające. Natomiast do zabiegów szczelinowania złóż niekonwencjonalnych w technologii *slickwater fracturing* wykorzystuje się lekkie podsadzki ceramiczne, charakteryzujące się zawartością tlenku glinu rzędu 5÷35%. Występują również tzw. ultralekkie podsadzki ceramiczne, o jeszcze mniejszej zawartości tego związku. Do produkcji podsadzek ceramicznych stosuje się przede wszystkim mieszanki glin, kaolinów, boksytów. Lekkie podsadzki ceramiczne posiadają najczęściej w swoim składzie mineralogicznym: mullit (kalcynowany kaolin): 60÷85%, krzemionkę: 5÷35% oraz krystobalit: 0÷20%. Występują również podsadzki o składzie mineralogicznym: mullit: 65÷85%, korund: 15÷35%. Zawierają one  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{SiO}_2$  oraz nieznaczną ilość  $\text{TiO}_2$  i  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Lekkie podsadzki ceramiczne posiadają gęstość nasypową zbliżoną do podsadzek kwarcowych, a ich ciężar właściwy jest rzędu  $2,60\div 2,90 \text{ g/cm}^3$ . Z kolei ultralekkie podsadzki ceramiczne posiadają ciężar właściwy ok.  $2,40 \text{ g/cm}^3$ . Charakteryzują się one lepszymi własnościami od piasków, tj. lepszą krągłością i kulistością ziaren oraz zdecydowanie większą odpornością na zgniatanie. Dzięki temu mogą być stosowane na średnich głębokościach ( $2000\div 3500 \text{ m}$ ), gdzie panują większe naprężenia ściskające, dochodzące do  $69,0 \text{ MPa}$  ( $10\ 000 \text{ psi}$ ), a temperatura złożowa wynosi ok.  $80\div 100^\circ\text{C}$ .

Kolejną grupą materiałów podsadzkowych są podsadzki żywicowe. Należą do nich podsadzki kwarcowe lub ceramiczne, których ziarna pokryte są dodatkową powłoką z żywicy. Powłoka ma na celu poprawienie parametrów krągłości i kulistości ziaren oraz odporności na zgniatanie (naprężenia ściskające). Podsadzki żywicowe ograniczają

w znacznym stopniu zjawisko przemieszczania się i wymywania ziaren podsadzki z wygenerowanych szczelin. Jak już wcześniej stwierdzono, zjawisko to ma miejsce podczas odbierania płynu pozabiegowego (tzw. *flowback*) z odwiertu oraz podczas późniejszej eksploatacji węglowodorów. Do utwardzania powłok żywicowych wykorzystuje się różnego rodzaju technologie utwardzania. Mogą być one stosowane podczas produkcji podsadzki, jak również w czasie zatłaczania jej do odwiertu. Przykładowe pokrycie podsadzki powłoką żywicową przedstawia rysunek 3 [2].



Rys. 3. Przykładowe pokrycie ziarna podsadzki powłoką z żywicy [2]

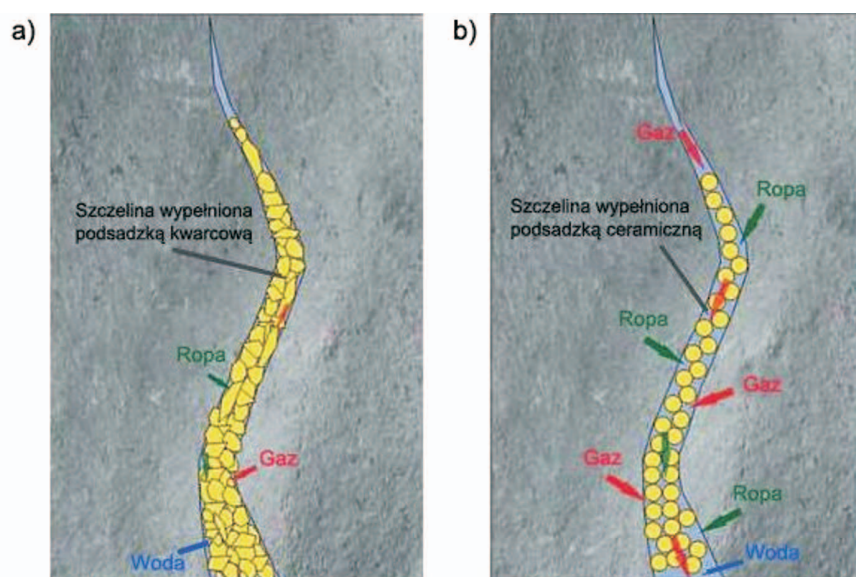
Do pokrycia ziarna podsadzki mogą być stosowane: żywice epoksydowe wraz z utwardzaczem aminowym lub środkiem sieciującym oraz żywice fenolowe, będące mieszaniną żywicy i heksametylenotetraaminy (środek sieciujący) [5]. W obydwu tych przypadkach właściwości utwardzonej żywicy zależą od stechiometrii żywicy i środka sieciującego. Podsadzka pokryta żywicą musi być kompatybilna z płynami złożowymi oraz z płynem szczelinującym, czyli nie może pogarszać jego własności reologicznych. Żywice mogą uwalniać związki chemiczne, które w kontakcie z płynem szczelinującym mogą powodować zmianę jego pH.

W ostatnich latach podczas zabiegu szczelinowania w technologii *slickwater fracturing* podjęto próby mieszanina ziaren podsadzek lekkich z dodatkiem niewielkich ilości ziaren o wysokiej odporności na zgniatanie. Miało to zapewnić zwiększenie wytrzymałości materiałów podsadzkowych o małym ciężarze właściwym. Rozpoczęto również badania nad nowymi materiałami podsadzkowymi, tzw. ultralekkimi, których gęstość względna odniesiona do wody wynosi 1,05, co pozwala im praktycznie unosić się na jej powierzchni [3, 4]. Jest to prawie idealnie kulista podsadzka o gładkiej, błyszczącej powierzchni. Jednak tego typu materiał jest bardzo drogi i w związku z tym koszty zabiegu mogą być znacznie wyższe [4].

Odpowiedni dobór materiału podsadzkowego powinien zapewnić uzyskanie właściwej przewodności całego

wygenerowanego systemu szczelin oraz umieszczenie podsadzki w jak najdalszych częściach utworzonej sieci po wykonaniu zabiegu szczelinowania (rysunek 4).

Rys. 4. Wizualne przedstawienie wypełnienia wygenerowanej szczeliny w złożu przy zastosowaniu:  
a) podsadzki kwarcowej (mała przewodność szczeliny);  
b) podsadzki ceramicznej (duża przewodność szczeliny) [2]



### Właściwy dobór materiałów podsadzkowych do zabiegów hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych

Przed zastosowaniem danego materiału podsadzkowego do hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych należy w pierwszej kolejności wyznaczyć jego podstawowe właściwości. Mają one umożliwić prawidłowy transport podsadzki z powierzchni odwiertu przez armaturę otworową i perforację do powstałego systemu szczelin. Przy wyborze materiału należy również uwzględnić warunki panujące w złożu.

Materiał podsadzkowy stosowany do zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych przy zastosowaniu technologii *slickwater fracturing* powinien charakteryzować się między innymi niskim ciężarem właściwym oraz zapewniać odpowiednią przewodność i przepuszczalność wygenerowanych szczelin w złożu.

Mając na uwadze wymienione cechy materiału podsadzkowego, po prawidłowym pobraniu i przygotowaniu jego próbki poddaje się go licznym badaniom laboratoryjnym [8, 9, 13]. Podstawowe badania mają na celu stwierdzenie, czy może być stosowany jako *proppant* do zabiegów hydraulicznego szczelinowania złóż. Wykonuje się je na podstawie procedur pomiarowych zawartych w normie:

- International Standard ISO 13503-2:2006(E): *Measurement of properties of proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations* [8];
- PN-EN ISO 13503-2: *Pomiary właściwości materiałów podsadzkowych używanych podczas zabiegów hydraulicznego szczelinowania oraz wykonywania obsypki zwirowej (ISO 13503-2:2006)* [13].

Normy te dotyczą różnych rodzajów podsadzek o standardowych rozmiarach: 6÷12, 8÷16, 12÷18, 12÷20, 16÷20,

16÷30, 20÷40, 30÷50, 40÷60, 40÷70 i 70÷140 mesh. Graniczne wielkości poszczególnych testów dla różnych rodzajów podsadzek, których przekroczenie może powodować niedopuszczenie badanego materiału podsadzkowego do stosowania w zabiegach hydraulicznego szczelinowania złóż, przedstawia norma:

- International Standard ISO 13503-2:2006/Amd.1:2009(E): *Measurement of properties of proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations, AMENDMENT 1: Addition of Annex B: Proppant specification* [9].

Do podstawowych właściwości materiału podsadzkowego należą: granulacja, średnia średnica ziaren, kulistość i krągłość, rozpuszczalność w kwasie, zawartość zanieczyszczeń, gęstość nasypowa, gęstość pozorną, gęstość absolutną oraz wytrzymałość podsadzki na jednoosiowe ściskanie, tzw. *crush test* [8, 9, 13].

Oprócz wyżej wymienionych oznaczeń wykonuje się także testy przewodności i przepuszczalności materiału podsadzkowego dla różnych jego koncentracji w warunkach laboratoryjnych. Według dostępnej wiedzy literaturowej oraz licznym przeprowadzonych badań przez różne firmy i jednostki naukowo-badawcze najbardziej wiarygodne wyniki przewodności i przepuszczalności, charakterystyczne dla badanego materiału podsadzkowego, uzyskuje się, stosując tzw. długie testy przewodności, oparte na:

- procedurze pomiarowej opracowanej przez firmę StimLab;
  - International Standard ISO 13503-5:2006: *Petroleum and natural gas industries – Completion fluids and materials – Part 5: Procedures for Measuring the Long-term Conductivity of Proppants* [10];
- oraz odpowiadającej jej polskiej normie:

- 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)* [14].

Są to testy dość kosztowne oraz pracochłonne.

Występują również tzw. krótkie testy przewodności, które wykonuje się według:

- American Petroleum Institute: *Recommended Practices for Evaluating Short Term Proppant Pack Conductivity* API RP 61 [1].

Celem tych testów laboratoryjnych jest określenie przewodności i przepuszczalności szczeliny wypełnionej materiałem podsadzkowym w funkcji naprężenia ściskającego, z uwzględnieniem czasu działania tego naprężenia, wielkości przepływu i temperatury. Parametry testów przedstawione w tablicach 1 i 2 są tak dobrane, by w komorze pomiarowej zachować przepływ laminarny w ośrodku porowatym, opisany prawem Darcy’ego. W przypadku dużych szybkości i uzyskania przepływu burzliwego może wystąpić różnica pomiędzy wynikami eksperymentalnymi oraz wynikami uzyskiwanymi na podstawie prawa Darcy’ego. Spowodowane jest to głównie przez efekty kinetyczne. Dlatego do równania prawa Darcy’ego dodaje się człon reprezentujący energię kinetyczną oraz współczynnik  $\beta$ .

Ani długie, ani krótkie testy nie są przeznaczone do określania wartości bezwzględnych przewodności warstwy materiału podsadzkowego w warunkach panujących w złożu. W przedstawionych procedurach nie uwzględniono wpływu drobnych cząstek fazy stałej, twardości skał złoża, płynów obecnych w złożu i/lub innych czynników [14]. Dane literaturowe podają również, że znaczący spadek przewodności i przepuszczalności szczeliny następuje przez pierwsze 30 godzin. W kolejnych godzinach testu utrata przewodności jest znacznie mniejsza. Związane jest to z tzw. „układaniem się” ziaren podsadzki w pierwszej fazie działania naprężenia ściskającego, równego ciśnieniu zamykania szczeliny. W wyniku tego procesu znacznie zmniejsza się porowatość materiału podsadzkowego wypełniającego szczelinę. Prowadzi to do zwiększenia oporów przepływu i obniżenia przewodności. W konsekwencji braku przestrzeni na przemieszczanie się ziaren podsadzki następuje wzrost naprężeń wewnętrznych w ziarnach, co powoduje ich kruszenie. Powstałe drobiny ziaren podsadzki unoszone są w medium pomiarowym, powodują przemykanie kanałów porowych i dalsze ograniczenie przewodności i przepuszczalności. Opisywane powyżej zjawiska, powodujące pogorszenie warunków przepływu, mają miejsce w pierwszych godzinach testu. W dalszym etapie pomiaru parametry podsadzki zostają ustabilizowane.

### Wykonanie laboratoryjnych badań materiału podsadzkowego

Po zapoznaniu się z najczęściej stosowanymi rodzajami podsadzek do zabiegów szczelinowania w złożach niekonwencjonalnych, oferowanych przez największych światowych producentów oraz dystrybutorów, do badań zostały wytypowane podsadzki o rozmiarach ziaren  $425 \div 212 \mu\text{m}$  ( $40 \div 70$  mesh). Wykorzystane podsadzki przedstawiono na rysunku 5.

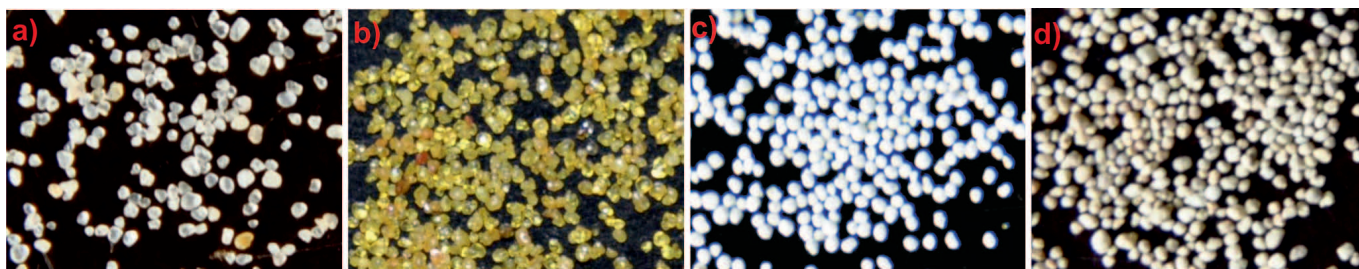
Podsadzką kwarcową oznaczoną jako „A” jest piasek kwarcowy (99,0% kwarcu) o właściwościach porównywalnych do piasku Northern White Sand wydobywanego na Środkowym Zachodzie w USA.

Podsadzką kwarcową pokrytą żywicą oznaczoną jako „B” jest piasek kwarcowy (Northern White Sand, ok. 99,8%

kwarcu, wydobywany w USA) pokryty mieszaniną żywicy fenylovo-formaldehadowej, rzędu  $2 \div 5\%$ , i heksametylenotetraaminy (środek sieciujący), poniżej 1%. Jest ona kompatybilna z tradycyjnymi płynami szczelinującymi oraz ze środkami pianotwórczymi.

Lekką podsadzką ceramiczną oznaczoną jako „C” jest podsadzka o składzie mineralogicznym: mullit (kalcynowany kaolin)  $60 \div 85\%$ , krzemionka amorficzna  $5 \div 35\%$  oraz kryształit  $0 \div 20\%$ . Posiada ona w swoim składzie:  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 51\%$ ,  $\text{SiO}_2 - 45\%$ ,  $\text{TiO}_2 - 2\%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 1\%$  i inne  $- 1\%$ .

Skład mineralogiczny kolejnej lekkiej podsadzki ceramicznej, oznaczonej jako „D”, to: mullit  $65 \div 85\%$  oraz korund  $15 \div 35\%$ .



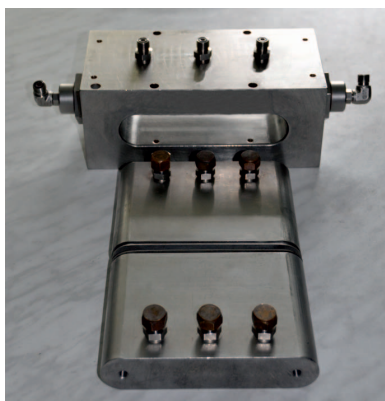
Rys. 5. Wygląd badanych podsadzek

- a) podsadzka kwarcowa – „A”, b) podsadzka kwarcowa pokryta żywicą – „B”,  
c) lekka podsadzka ceramiczna – „C”, d) lekka podsadzka ceramiczna – „D”

W pierwszej kolejności zostały wyznaczone podstawowe właściwości materiałów podsadzkowych w laboratorium INiG – PIB Oddział Krosno, zgodnie z normą ISO 13503-2:2006(E) [8, 13]. Spełniały one wszystkie kryteria normy ISO 13503-2:2006/Amd.1:2009(E) [9] stawiane podsadzkom.

W celu właściwego doboru materiału podsadzkowego do warunków panujących w złożu zaleca się wykonanie tzw. długich testów przewodności. Uwzględniają one wpływ czasu wywierania naprężeń ściskających oraz zjawisko wciskania ziaren podsadzki w skałę (*embedment*) na spadek przewodności szczeliny wypełnionej materiałem podsadzkowym. W związku ze znacznym kosztem oraz z pracochłonnością przeprowadzenia tego typu testów zdecydowano się na wykonanie dla badanych materiałów podsadzkowych jedynie tzw. krótkich testów przewodności. Badania wykonano na stanowisku Proppant Conductivity (znajdującym się w INiG – PIB Oddział Krosno w Zakładzie Stymulacji Wydobywania Węglowodorów) w komorze API, przedstawionym na rysunku 6.

Materiał podsadzkowy umieszczano pomiędzy dwiema płytkami metalowymi. Na ich powierzchniach były widoczne wgniecenia, spowodowane wciskaniem w płytki ziaren pod-



Rys. 6. Schemat stanowiska Proppant Conductivity wraz z komorą API do badań materiału podsadzkowego

sadzki pod wpływem wywieranych naprężeń ściskających. Zastosowanie metalowych płytek w niewielkim stopniu odzwierciedla zjawisko *embedment* (wciskania ziaren podsadzki), inaczej niż ma to miejsce w przypadku wykorzystania kształtek piaskowcowych lub skały. Płytki metalowe nie ograniczają znacząco występowania podczas badań zjawiska związanego ze znacznym udziałem przepływu cieczy (prześlizgiwanie się cieczy) na kontakcie podsadzka–płytką w porównaniu do przepływu tylko przez podsadzkę.

Celem badań było wytypowanie materiału podsadzkowego, który charakteryzuje się największą przewodnością i przepuszczalnością przy zadanych wartościach naprężeń ściskających w temperaturze 90°C. Zastosowano małe koncentracje powierzchniowe podsadzek, tj. 4,88 kg/m<sup>2</sup> (1 lb/ft<sup>2</sup>) i 9,76 kg/m<sup>2</sup> (2 lb/ft<sup>2</sup>), tak aby zasymulować szczeliny o małej

rozwarłości (wysokości), które są generowane i podsadzane w złożach niekonwencjonalnych.

#### Przygotowanie komory, płynów oraz przebieg pomiarów dla krótkich testów przewodności [1]

1. Dwie płytki metalowe o wysokiej wytrzymałości na ściskanie, o znormalizowanych wymiarach umieszcza się wraz z dwoma tłokami na prasie (rysunek 6) w celu wyzerowania wysokości szczeliny.
2. Wyznacza się ilość materiału podsadzkowego do uzyskania zadanej koncentracji powierzchniowej, według równania (1):

$$M_p = 31,50 \cdot C \quad (1)$$

gdzie:

$M_p$  – masa materiału podsadzkowego [g],

$C$  – jednostkowe obciążenie wywierane przez materiał [lb/ft<sup>2</sup>].

3. Komorę API wypełnia się odważonym materiałem podsadzkowym. Podsadzka umieszczana jest pomiędzy dwiema płytkami metalowymi.
4. Przed wykonaniem pomiarów roztwór 2-proc. KCl musi być

odtleniony. Zawartość tlenu nie może przekroczyć maksymalnej dopuszczalnej wartości, tj. 10 ppm.

5. Komorę z tłokami umieszcza się w prasie hydraulicznej. W tych warunkach komorę odpowietrza i nasycy się roztworem 2-proc. KCl (wcześniej odtlenionym i nakrzemionym). Nasycanie solanki krzemionką odbywa się w wysokociśnieniowym cylindrze, wypełnionym piaskiem. Po-

wyższe czynności zapobiegają rozpuszczaniu materiału podsadzkowego. Zestaw do nakrzemiania wyposażony jest w płaszcz grzewczy, który z kolei zapewnia zatłaczanej do komory cieczy wymaganą temperaturę badania.

6. Podgrzewa się komorę API do temperatury badania przy użyciu płyt grzewczych.
7. Po uzyskaniu temperatury badania w komorze API oraz po nasyceniu materiału podsadzkowego 2-proc. KCl przystępuje się do właściwego testu przewodności według parametrów przedstawionych w tablicach 1 i 2. Naprężenia należy zwiększać do zadanej wartości ze stałą prędkością. Przewodność i przepuszczalność określa się jako średnią arytmetyczną z otrzymanych wyników dla poszczególnych natężeń przepływu cieczy podanych w tablicach 1 i 2. Podczas testu rejestruje się ciśnienie w komorze, ciśnienie

różnicowe, wysokość szczeliny, naprężenie działające na podsadzkę, temperaturę w komorze, wydajność i lepkość cieczy przepływającej przez warstwę podsadzki. Pomiar z zastosowaniem innych naprężeń ściskających są opcjonalne.

8. Obliczanie wartości przepuszczalności i przewodności. Dla wyznaczenia tych wartości stosuje się podstawowe równanie Darcy'ego (równanie 2), charakterystyczne dla cieczy przy przepływie laminarnym:

$$k = \frac{\mu \cdot Q \cdot L}{A(\Delta P)} \quad (2)$$

gdzie:

$k$  – przepuszczalność warstwy materiału podsadzkowego [D],  
 $\mu$  – lepkość cieczy użytej do badań w temperaturze badań [cP],  
 $Q$  – natężenie przepływu [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ],  
 $L$  – długość odcinka między otworami ciśnieniowymi [cm],  
 $A$  – pole powierzchni przekroju prostopadłego do kierunku przepływu cieczy [ $\text{cm}^2$ ], wyznaczone według równania (3),

$\Delta P$  – spadek ciśnienia pomiędzy portami pomiarowymi (ciśnienie na końcu szczeliny minus ciśnienie na początku szczeliny) [atm].

$$A = w \cdot W_f \quad (3)$$

gdzie:

$w$  – szerokość warstwy podsadzki [cm],  
 $W_f$  – wysokość warstwy podsadzki [cm].

Po przekształceniu do wyznaczenia przepuszczalności materiału podsadzkowego stosuje się poniższe równanie (4):

$$k = \frac{\mu \cdot Q \cdot L}{w \cdot W_f \cdot (\Delta P)} \quad (4)$$

Natomiast do określenia przewodności materiału podsadzkowego wykorzystuje się równanie (5):

$$k \cdot W_f = \frac{\mu \cdot Q \cdot L}{w \cdot (\Delta P)} \quad (5)$$

gdzie:

$k \cdot W_f$  – przewodność materiału podsadzkowego [D · cm].

Krótkie testy przewodności dla podsadzki kwarcowej oznaczonej jako „A” oraz podsadzki kwarcowej pokrytej żywicą oznaczonej jako „B” zostały wykonane zgodnie z parametrami przedstawionymi w tabelicy 1 dla rozmiaru ziaren  $425 \div 212 \mu\text{m}$  ( $40 \div 70$  mesh). Dodatkowo testy poszerzono o wartość naprężeń ściskających wynoszących 82,7 MPa

Tablica 1. Parametry krótkiego testu przewodności i przepuszczalności dla podsadzek kwarcowych oraz podsadzek kwarcowych pokrytych żywicą [1]

Naprężenie ściskające [MPa] (psi)	Prędkość przepływu cieczy [ml/min]	Czas działania naprężenia ściskającego (dla różnych rozmiarów podsadzek, mesh) [min]				
		12÷20	20÷40	30÷50	40÷70	70÷140
6,9 (1000)	2,5 5,0 10,0	60	15	15	15	15
13,8 (2000)	2,5 5,0 10,0	90	15	15	15	15
27,6 (4000)	2,5 5,0 10,0	90	60	15	15	15
41,4 (6000)	1,25 2,5 5,0	90	60	15	15	15
55,2 (8000)	1,00 2,0 4,0	90	60	45	45	45
69,0 (10000)	1,00 2,0 4,0	90	60	60	60	60

Tablica 2. Parametry krótkiego testu przewodności i przepuszczalności dla podsadzek ceramicznych oraz dla podsadzek ceramicznych pokrytych żywicą [1]

Naprężenie ściskające [MPa] (psi)	Prędkość przepływu cieczy [ml/min]	Czas działania naprężenia ściskającego (dla wszystkich rozmiarów podsadzek) [min]
6,9 (1000)	2,5 5,0 10,0	15
13,8 (2000)	2,5 5,0 10,0	15
27,6 (4000)	2,5 5,0 10,0	15
41,4 (6000)	2,5 5,0 10,0	15
55,2 (8000)	2,5 5,0 10,0	15
69,0 (10000)	2,5 5,0 10,0	15
82,7 (12000)	2,5 5,0 10,0	15
96,5 (14000)	2,5 5,0 10,0	15

(12 000 psi), przy parametrach badania odpowiadających poprzedniemu naprężeniu. Natomiast krótkie testy przewodności dla podsadzek ceramicznych oznaczonych jako „C” i „D” zostały wykonane zgodnie z parametrami przedstawionymi w tabelicy 2. Temperatura badań wynosiła 90°C.

Dane pomiarowe były zapisywane w programie komputerowym. Przewodność i przepuszczalność podsadzki dla zadanego naprężenia ściskającego określona została jako średnia arytmetyczna wartości uzyskanych dla trzech różnych prędkości przepływu 2-proc. KCl. W celu konwersji członu  $k \cdot W_f$  – z D · cm na  $\text{m}^2 \cdot \text{m}$  – wykonywano mnożenie przez stałą  $10^{-12} \text{m}^2 \cdot \text{m}$ , natomiast dla konwersji przepuszczalności  $k$  z D na  $\text{m}^2$  mnożono przez stałą  $10^{-12} \text{m}^2$ . Dla każdego materiału i każdej koncentracji podsadzki test powtarzano, a uzyskane wartości przewodności i przepuszczalności uśredniano. Jako miarę niepewności oszacowania uśrednionych wartości dla przewodności i przepuszczalności wyliczono odchylenie standardowe dla średniej.

Wyniki krótkich testów przewodności i przepuszczalności dla poszczególnych materiałów podsadzkowych zostały przedstawione w tablicach 3–10 oraz na rysunkach 7 i 8.



Tablica 3. Wyniki badań dla krótkich testów przewodności i przepuszczalności podsadzki kwarcowej „A”, o granulacji ziaren 425÷212 µm (40÷70 mesh), dla koncentracji powierzchniowej 4,88 kg/m<sup>2</sup> (1 lb/ft<sup>2</sup>) w 90°C

Ciśnienie zamknięcia [MPa]	<b>6,9</b>	<b>13,8</b>	<b>27,6</b>	<b>41,4</b>	<b>55,2</b>	<b>69,0</b>	<b>82,7</b>
Wysokość szczeliny [cm]	0,3519	0,3325	0,3012	0,2737	0,2491	0,2290	0,2113
Przewodność [ $10^{-15}$ m <sup>2</sup> · m]	227,5 +/- 4,9	184,5 +/- 6,6	99,8 +/- 5,3	44,3 +/- 1,3	19,7 +/- 0,1	10,2 +/- 0,2	6,6 +/- 0,6
Względne zmniejszenie przewodności [%]	0	19	46	56	56	48	36
Przepuszczalność [ $10^{-12}$ m <sup>2</sup> ]	64,7 +/- 1,7	55,5 +/- 2,1	33,1 +/- 1,7	16,2 +/- 0,4	7,9 +/- 0,1	4,5 +/- 0,1	3,1 +/- 0,3
Względne zmniejszenie przepuszczalności [%]	0	14	40	51	51	43	30

Tablica 4. Wyniki badań dla krótkich testów przewodności i przepuszczalności podsadzki kwarcowej pokrytej żywicą „B”, o granulacji ziaren 425÷212 µm (40÷70 mesh), dla koncentracji powierzchniowej 4,88 kg/m<sup>2</sup> (1 lb/ft<sup>2</sup>) w 90°C

Ciśnienie zamknięcia [MPa]	<b>6,9</b>	<b>13,8</b>	<b>27,6</b>	<b>41,4</b>	<b>55,2</b>	<b>69,0</b>	<b>82,7</b>
Wysokość szczeliny [cm]	0,3437	0,3272	0,3028	0,2827	0,2630	0,2462	0,2317
Przewodność [ $10^{-15}$ m <sup>2</sup> · m]	158,2 +/- 3,8	135,5 +/- 2,5	96,8 +/- 0,7	65,6 +/- 0,2	39,0 +/- 0,2	24,6 +/- 0,7	17,3 +/- 0,9
Względne zmniejszenie przewodności [%]	0	14	29	32	40	37	30
Przepuszczalność [ $10^{-12}$ m <sup>2</sup> ]	46,1 +/- 1,6	41,4 +/- 1,2	32,0 +/- 0,6	23,2 +/- 0,3	14,8 +/- 0,2	10,0 +/- 0,5	7,5 +/- 0,2
Względne zmniejszenie przepuszczalności [%]	0	10	23	27	36	33	25

Tablica 5. Wyniki badań dla krótkich testów przewodności i przepuszczalności podsadzki ceramicznej „C”, o granulacji ziaren 425÷212 µm (40÷70 mesh), dla koncentracji powierzchniowej 4,88 kg/m<sup>2</sup> (1 lb/ft<sup>2</sup>) w 90°C

Ciśnienie zamknięcia [MPa]	<b>6,9</b>	<b>13,8</b>	<b>27,6</b>	<b>41,4</b>	<b>55,2</b>	<b>69,0</b>	<b>82,7</b>	<b>96,5</b>
Wysokość szczeliny [cm]	0,3540	0,3381	0,3140	0,2918	0,2701	0,2502	0,2319	0,2148
Przewodność [ $10^{-15}$ m <sup>2</sup> · m]	419,1 +/- 12,7	380,3 +/- 18,9	300,5 +/- 16,4	204,5 +/- 17,6	120,9 +/- 9,0	70,3 +/- 3,6	44,7 +/- 1,1	30,3 +/- 0,9
Względne zmniejszenie przewodności [%]	0	9	21	32	41	42	36	32
Przepuszczalność [ $10^{-12}$ m <sup>2</sup> ]	118,4 +/- 1,7	112,5 +/- 4,6	95,7 +/- 5,3	70,1 +/- 6,5	44,8 +/- 4,0	28,1 +/- 2,1	19,3 +/- 1,2	14,2 +/- 1,2
Względne zmniejszenie przepuszczalności [%]	0	5	15	27	36	37	31	27

Tablica 6. Wyniki badań dla krótkich testów przewodności i przepuszczalności podsadzki ceramicznej „D”, o granulacji ziaren 425÷212 µm (40÷70 mesh), dla koncentracji powierzchniowej 4,88 kg/m<sup>2</sup> (1 lb/ft<sup>2</sup>) w 90°C

Ciśnienie zamknięcia [MPa]	<b>6,9</b>	<b>13,8</b>	<b>27,6</b>	<b>41,4</b>	<b>55,2</b>	<b>69,0</b>	<b>82,7</b>	<b>96,5</b>
Wysokość szczeliny [cm]	0,3607	0,3417	0,3153	0,2919	0,2689	0,2476	0,2275	0,2096
Przewodność [ $10^{-15}$ m <sup>2</sup> · m]	375,7 +/- 3,5	322,9 +/- 1,1	247,3 +/- 1,0	181,0 +/- 0,9	120,0 +/- 0,1	75,2 +/- 0,3	49,2 +/- 0,6	33,5 +/- 0,3
Względne zmniejszenie przewodności [%]	0	14	23	27	34	37	35	32
Przepuszczalność [ $10^{-12}$ m <sup>2</sup> ]	104,2 +/- 0,2	94,5 +/- 1,7	78,5 +/- 2,1	62,0 +/- 1,5	44,7 +/- 1,6	30,4 +/- 1,6	21,7 +/- 1,1	16,0 +/- 1,4
Względne zmniejszenie przepuszczalności [%]	0	9	17	21	28	32	29	26

Tablica 7. Wyniki badań dla krótkich testów przewodności i przepuszczalności podsadzki kwarcowej „A”, o granulacji ziaren 425÷212 µm (40÷70 mesh), dla koncentracji powierzchniowej 9,76 kg/m<sup>2</sup> (2 lb/ft<sup>2</sup>) w 90°C

Ciśnienie zamknięcia [MPa]	<b>6,9</b>	<b>13,8</b>	<b>27,6</b>	<b>41,4</b>	<b>55,2</b>	<b>69,0</b>	<b>82,7</b>
Wysokość szczeliny [cm]	0,6189	0,6000	0,5604	0,5172	0,4805	0,4520	0,4284
Przewodność [ $10^{-15}$ m <sup>2</sup> · m]	376,9 +/- 22,8	339,6 +/- 18,2	209,3 +/- 3,8	87,7 +/- 3,8	37,2 +/- 1,1	18,8 +/- 0,3	10,1 +/- 0,6
Względne zmniejszenie przewodności [%]	0	10	38	58	58	49	46
Przepuszczalność [ $10^{-12}$ m <sup>2</sup> ]	60,9 +/- 2,3	56,6 +/- 1,8	37,4 +/- 1,5	17,0 +/- 1,1	7,8 +/- 0,4	4,2 +/- 0,2	2,4 +/- 0,2
Względne zmniejszenie przepuszczalności [%]	0	7	34	55	54	46	43

Tablica 8. Wyniki badań dla krótkich testów przewodności i przepuszczalności podsadzki kwarcowej pokrytej żywicą „B”, o granulacji ziaren 425÷212 µm (40÷70 mesh), dla koncentracji powierzchniowej 9,76 kg/m<sup>2</sup> (2 lb/ft<sup>2</sup>) w 90°C

Ciśnienie zamknięcia [MPa]	6,9	13,8	27,6	41,4	55,2	69,0	82,7
Wysokość szczeliny [cm]	0,6013	0,5858	0,5567	0,5310	0,5015	0,4759	0,4537
Przewodność [10 <sup>-15</sup> m <sup>2</sup> · m]	251,8 +/- 0,5	215,9 +/- 0,8	168,8 +/- 0,1	118,1 +/- 6,4	72,0 +/- 2,2	44,0 +/- 3,8	29,3 +/- 2,0
Względne zmniejszenie przewodności [%]	0	14	22	30	39	39	34
Przepuszczalność [10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> ]	41,9 +/- 0,1	36,9 +/- 0,2	30,3 +/- 0,2	22,2 +/- 0,9	14,4 +/- 0,2	9,3 +/- 0,6	6,4 +/- 0,2
Względne zmniejszenie przepuszczalności [%]	0	12	18	27	35	36	30

Tablica 9. Wyniki badań dla krótkich testów przewodności i przepuszczalności podsadzki ceramicznej „C”, o granulacji ziaren 425÷212 µm (40÷70 mesh), dla koncentracji powierzchniowej 9,76 kg/m<sup>2</sup> (2 lb/ft<sup>2</sup>) w 90°C

Ciśnienie zamknięcia [MPa]	6,9	13,8	27,6	41,4	55,2	69,0	82,7	96,5
Wysokość szczeliny [cm]	0,6475	0,6287	0,6019	0,5752	0,5451	0,5154	0,4890	0,4658
Przewodność [10 <sup>-15</sup> m <sup>2</sup> · m]	635,0 +/- 40,1	581,1 +/- 18,1	493,5 +/- 21,9	380,0 +/- 24,5	248,6 +/- 7,4	145,4 +/- 0,2	87,2 +/- 3,4	56,0 +/- 1,5
Względne zmniejszenie przewodności [%]	0	8	15	23	35	42	40	36
Przepuszczalność [10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> ]	98,1 +/- 6,5	92,5 +/- 2,8	82,0 +/- 3,6	66,1 +/- 4,6	45,6 +/- 1,9	28,2 +/- 0,5	17,8 +/- 0,3	12,0 +/- 0,1
Względne zmniejszenie przepuszczalności [%]	0	6	11	19	31	38	37	33

Tablica 10. Wyniki badań dla krótkich testów przewodności i przepuszczalności podsadzki ceramicznej „D”, o granulacji ziaren 425÷212 µm (40÷70 mesh), dla koncentracji powierzchniowej 9,76 kg/m<sup>2</sup> (2 lb/ft<sup>2</sup>) w 90°C

Ciśnienie zamknięcia [MPa]	6,9	13,8	27,6	41,4	55,2	69,0	82,7	96,5
Wysokość szczeliny [cm]	0,6240	0,6045	0,5764	0,5496	0,5198	0,4892	0,4614	0,4372
Przewodność [10 <sup>-15</sup> m <sup>2</sup> · m]	556,3 +/- 6,6	491,3 +/- 16,7	421,6 +/- 22,1	332,9 +/- 0,3	232,1 +/- 0,4	148,4 +/- 1,7	93,9 +/- 0,5	62,6 +/- 0,4
Względne zmniejszenie przewodności [%]	0	12	14	21	30	36	37	33
Przepuszczalność [10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> ]	89,2 +/- 0,1	81,3 +/- 1,4	73,1 +/- 2,2	60,6 +/- 1,8	44,7 +/- 1,6	30,4 +/- 1,7	20,4 +/- 1,3	14,3 +/- 0,9
Względne zmniejszenie przepuszczalności [%]	0	9	10	17	26	32	33	30

### Podsumowanie i wnioski

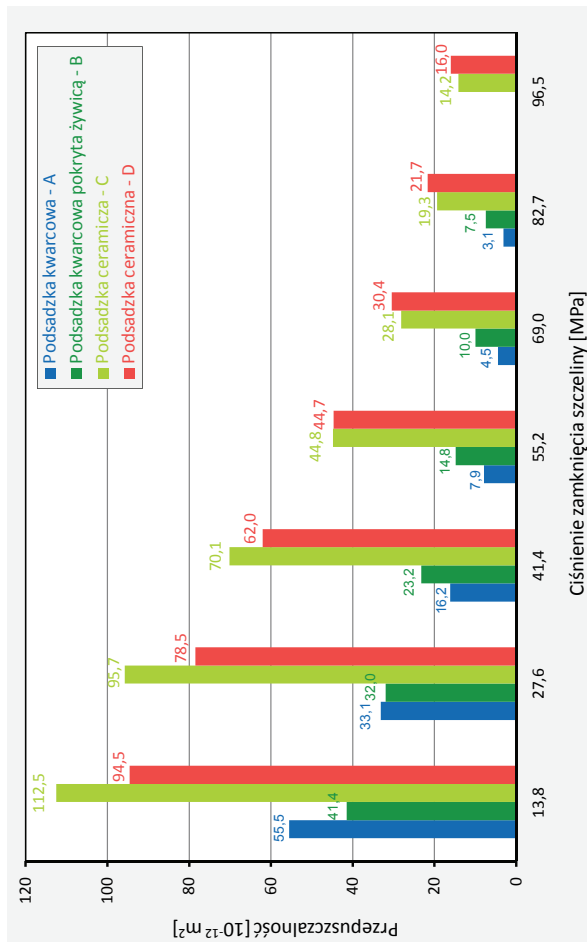
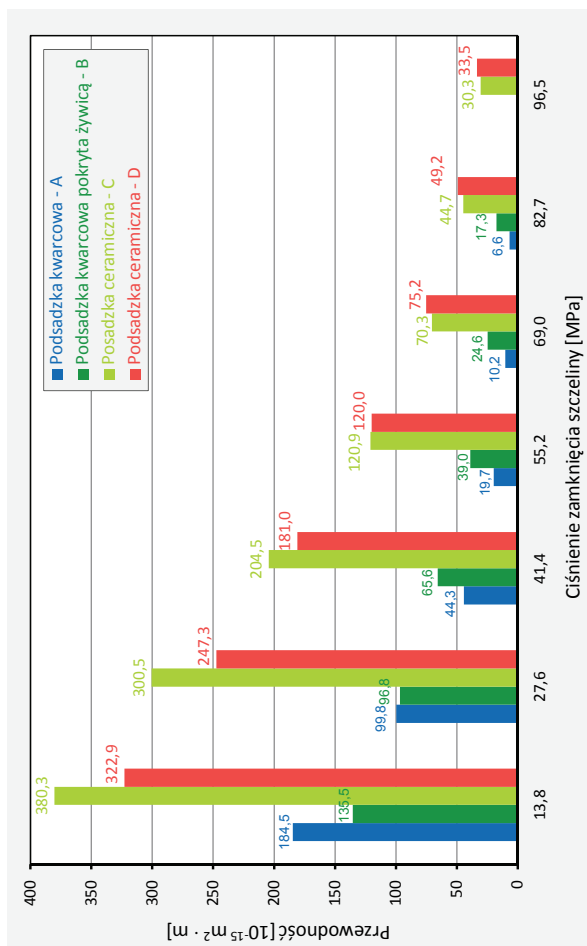
Badane podsadzki o granulacji ziaren 425÷212 µm (40÷70 mesh) spełniają wszystkie kryteria stawiane podstawowym właściwościom podsadzek stosowanych do zabiegów hydraulicznego szczelinowania. Podsadzka kwarcowa pokryta żywicą, oznaczona jako „B”, charakteryzowała się najmniejszą gęstością pozorną wśród badanych podsadzek, wynoszącą 2,53 g/cm<sup>3</sup>. Największą gęstość pozorną posiadała podsadzka ceramiczna oznaczona jako „D”, i wynosiła ona 2,90 g/cm<sup>3</sup>.

W celu właściwego doboru podsadzki do zabiegu szczelinowania zostały wykonane krótkie testy przewodności i przepuszczalności materiału podsadzkiowego umieszczanego pomiędzy dwiema metalowymi płytkami. Najlepsze wyniki uzyskano dla lekkich podsadzek ceramicznych, oznaczonych jako „C” oraz „D” (rysunek 7 i 8), dla obu koncentracji powierzchniowych, tj. 4,88 kg/m<sup>2</sup> (1 lb/ft<sup>2</sup>) i 9,76 kg/m<sup>2</sup> (2 lb/ft<sup>2</sup>), w temperaturze 90°C. Były one zdecydowanie wyższe od wyników otrzymanych dla pozostałych dwóch podsadzek.

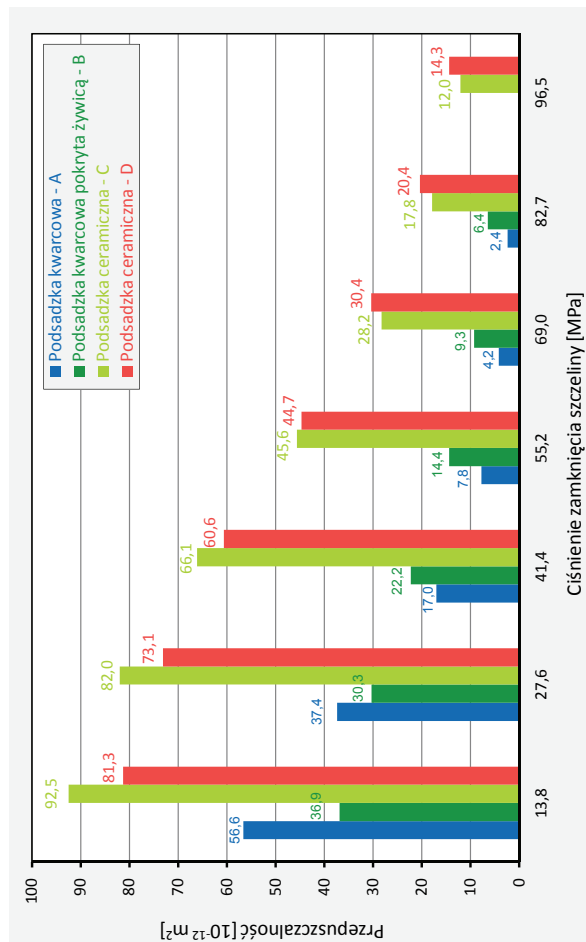
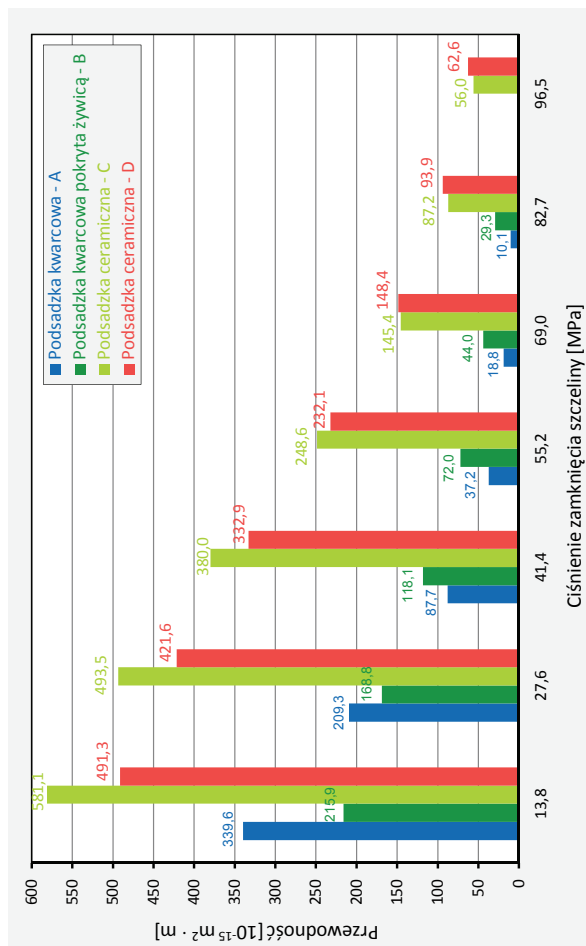
Znaczący wzrost przewodności i przepuszczalności badanych materiałów podsadzkiowych w stosunku do podsadzki kwarcowej oznaczonej jako „A” zaobserwowano od wartości naprężenia 41,4 MPa (6000 psi). Również podsadzka „B” od tej wartości naprężenia charakteryzowała się wyższą przewodnością i przepuszczalnością od podsadzki „A”.

Na podstawie analizy otrzymanych wyników z krótkich testów przewodności dla niskich koncentracji powierzchniowych, tj. 4,88 kg/m<sup>2</sup> (1 lb/ft<sup>2</sup>) i 9,76 kg/m<sup>2</sup> (2 lb/ft<sup>2</sup>) w 90°C, przy zakresie wywieranych naprężeń ściskających rzędu 55,2÷69,0 MPa (8000÷10000 psi), najlepszą podsadzką okazała się podsadzka oznaczona jako „C”. Jej gęstość pozorną wyniosła 2,67 g/cm<sup>3</sup>, a jej wytrzymałość na ściskanie przypisano do klasy 10.

Należy również zaznaczyć, że porównywalnymi do podsadzki „C” właściwościami i wartościami przewodności i przepuszczalności charakteryzowała się podsadzka „D”.



Rys. 7. Zestawienie przewodności i przepuszczalności dla testowanych materiałów podszadzkowych o granulacji ziaren 425÷212  $\mu\text{m}$  (40÷70 mesh), dla koncentracji powierzchniowej 4,88  $\text{kg}/\text{m}^2$  (1  $\text{lb}/\text{ft}^2$ ) w 90°C



Rys. 8. Zestawienie przewodności i przepuszczalności dla testowanych materiałów podszadzkowych o granulacji ziaren 425÷212  $\mu\text{m}$  (40÷70 mesh), dla koncentracji powierzchniowej 9,76  $\text{kg}/\text{m}^2$  (2  $\text{lb}/\text{ft}^2$ ) w 90°C

Przy tak nieznacznych różnicach, dodatkowym kryterium przy wyborze materiału podsadzkowego do zabiegu może być także łatwość produkcji, dostępność, jak również cena.

Badania przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych, zbliżonych do warunków złożowych najczęściej panujących w formacjach łupkowych występujących na obszarze Polski (tzn. głębokość zalegania 2000÷3500 m, naprężenia ściskające rzędu 55,2÷69,0 MPa, tj. 8000÷10000 psi, i temperatura złożowa rzędu 80÷100°C), wskazują, że najbardziej odpowiednim materiałem podsadzkowym może być lekka podsadzka ceramiczna.

Należy również zaznaczyć, że potwierdzeniem właściwie dobranego materiału podsadzkowego do podsadzenia wygenerowanych szczelin jest uzyskanie przepływu węglowod-

rów ze skały złożowej do odwiertu po wykonaniu zabiegu hydraulicznego szczelinowania.

Dotychczas w Polsce zostało już wykonanych kilkanaście zabiegów szczelinowań z zastosowaniem różnych materiałów podsadzkowych. Ze względu na brak ogólnie dostępnych informacji o ich wynikach nie można jednoznacznie stwierdzić, który z użytych materiałów podsadzkowych jest najbardziej odpowiedni dla zastosowania do szczelinowania złóż niekonwencjonalnych na obszarze Polski. Na koniec należy także zaznaczyć, że również płyn szczelinujący w znacznym stopniu przyczynia się do uszkodzenia przewodności szczeliny wypełnionej materiałem podsadzkowym. Dlatego też zaleca się, aby przewodność materiału podsadzkowego była jak najwyższa.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2014, nr 2, s. 75–86

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt.: *Opracowanie metodyki badania materiałów podsadzkowych do zabiegów szczelinowania złóż niekonwencjonalnych* – praca INiG na zlecenie MNiSW; nr archiwalny: DK-4100-80/13; nr zlecenia: 80/KS/13.

## Literatura

- [1] American Petroleum Institute: *Recommended Practices for Evaluating Short Term Proppant Pack Conductivity*. API RP 61, First edition, 1989.
- [2] Beckmann G.: *Measuring the Size and Shape of Frac Sand and other Proppants*. Webinar Presentation, 09.03.2012.
- [3] Brannon H. D., Kendrick D. E., Luckey E., Stipetich A.: *Multi-Stage Fracturing of Horizontal Wells Using Ninety-Five Quality Foam Provides Improved Shale Gas Production*. SPE 124767, 2009.
- [4] Czupski M., Kasza P., Wilk K.: *Płyny do szczelinowania złóż niekonwencjonalnych*. Nafta-Gaz 2013, nr 1, s. 42–50.
- [5] Dewprashad B. T., Abass H. H., Meadows D. L., Weaver J. D., Bennett B. J., Halliburton Energy Services: *A Method To Select Resin-Coated Proppants*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 3–6 October 1993, Houston, Texas.
- [6] Economides M. J., Nolte K. G.: *Reservoir Stimulation*. Second edition. Prentice Hall, Houston 1989.
- [7] Handren P., Palisch T.: *Successful Hybrid Slickwater Fracture Design Evolution – An East Texas Cotton Valley Taylor Case History*. SPE 110451, 2007.
- [8] International Standard ISO 13503-2:2006(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, Annex A – Formazin solution preparation*. First edition, 01.11.2006.
- [9] 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.
- [10] International Standard ISO 13503-5:2006: *Petroleum and natural gas industries – Completion fluids and materials – Part 5: Procedures for Measuring the Long-term Conductivity of Proppants*. First edition, 2006.
- [11] Kasza P.: *Zabiegi stymulacji wydobywania w niekonwencjonalnych złóżach węglowodorów*. Nafta-Gaz 2011, nr 10, s. 697–701.
- [12] Palisch T., Vincent M. C., Handren P. J.: *Slickwater Fracturing – food for thought*. SPE 115766, 2008.
- [13] 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 zwirowej (ISO 13503-2:2006)*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, styczeń 2010.
- [14] 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.



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](mailto:mateusz.maslowski@inig.pl)