

Laboratory evaluation of the proppant materials basic properties for potential application in geothermal reservoirs

Laboratoryjne badania podstawowych właściwości materiałów podsadzkowych pod kątem potencjalnego zastosowania w złożach geotermalnych



DOI: 10.15199/62.2026.5.12

Ceramic proppant materials with a grain size of 850/425 μm and varying Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , and Fe_2O_3 contents, bulk d., and mech. strength were tested for compressive stress for 2 and 120 min at 25 and 100°C. The ISPC proppant, characterized by medium compressive strength (bulk d. of 1.90 g/cm^3) and higher Al content, demonstrated significantly greater resistance to high compressive stresses compared to the lightweight LPC ceramic proppant with a d. of 1.51 g/cm^3 . Thermal exposure of the LPC proppant at 100°C, combined with an extended compressive stress duration of 55.17 MPa for 120 min, increased the proportion of crushed grains from 3.02% to 5.50%. Increasing the compressive stress to 68.96 MPa further increased the proportion of crushed grains from 7.44% to 11.13%. This value exceeded the permissible threshold of 10%, which is the criterion for proppant classification. In contrast, under the same conditions, the ISPC proppant demonstrated significantly higher crushing resistance, with the crushed grain content not exceeding 2.49%.

Keywords: geothermal energy, hydraulic fracturing, ceramic proppant, basic properties of proppant

Przedstawiono wyniki laboratoryjnych badań podsadzek ceramicznych o zróżnicowanej zawartości tlenku glinu, gęstości nasypowej oraz wytrzymałości, stosowanych w zabiegach hydraulicznego szczelinowania w przemyśle naftowym, pod kątem możliwości ich wykorzystania dla potrzeb geotermii. Podsadzki o granulacji 850/425 μm poddano działaniu naprężenia ściskającego przez 2 i 120 min, w temp. 25°C i 100°C. Podsadzka ISPC o średniej wytrzymałości na ściskanie (gęstości nasypowej 1,90 g/cm^3) i wyższej zawartości tlenku glinu charakteryzowała się znacznie wyższą odpornością na wysokie wartości naprężenia ściskającego niż lekka podsadzka ceramiczna LPC o gęstości 1,51 g/cm^3 . Wyrzanie podsadzki LPC w 100°C i wydłużenie czasu działania naprężenia ściskającego 55,17 MPa do 120 min spowodowało zwiększenie liczby skruszonych ziaren z 3,02% do 5,50%. Podniesienie naprężenia ściskającego do 68,96 MPa zaowocowało wzrostem liczby skruszonych ziaren tej podsadzki z 7,44% do 11,13%. Tym samym uzyskana wartość przekraczała dopuszczalną wartość 10%, stanowiącą kryterium przy określeniu klasy podsadzki. Podsadzka ISPC charakteryzowała się w takich warunkach znacznie lepszą odpornością na kruszenie, nieprzekraczającą wartości 2,49%.

Słowa kluczowe: geotermia, hydrauliczne szczelinowanie, materiał podsadzkowy, podsadzka ceramiczna, podstawowe właściwości podsadzki

XXI w. jest czasem poszukiwania oraz wdrażania nowoczesnych i niskoemisyjnych rozwiązań energetycznych, w których kluczową rolę odgrywają odnawialne źródła energii (OZE). Jedną z najszybciej rozwijających się gałęzi OZE jest energetyka geotermalna umożliwiającą pozy-

skiwanie ciepła Ziemi na potrzeby grzewcze i produkcję energii elektrycznej¹⁻⁴). W konwencjonalnych systemach geotermalnych, tzw. hydrotermalnych, które tworzone są w zawodnionych formacjach skalnych o wysokiej przepuszczalności, kluczowym elementem jest optymalny kontakt



Dr inż. Mateusz MASŁOWSKI (ORCID: 0000-0003-1181-8804) w roku 2003 ukończył studia na Wydziale Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH w Krakowie na kierunku górnictwo i geologia, specjalność gazownictwo ziemne. W 2022 r. uzyskał stopień doktora nauk inżynierijno-technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka na Wydziale Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Jest adiunktem w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym. Specjalność – intensyfikacja wydobycia węglowodorów oraz korozja.



Dr Rafał MOSKA (ORCID: 0000-0002-6353-9287) w roku 2012 ukończył studia na kierunku geologia, a w 2013 r. na kierunku geofizyka na Wydziale Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. W 2026 r. uzyskał stopień doktora nauk inżynierijno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka na Wydziale Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Jest starszym specjalistą badawczo-technicznym w Zakładzie Stymulacji Wydobycia Węglowodorów Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego. Specjalność – intensyfikacja wydobycia węglowodorów, geomechanika, geotermia niekonwencjonalna.

*** Adres do korespondencji:**

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno, tel.: (13) 436-89-41 wew. 5139, fax: (13) 436-79-71, e-mail: maslowski@inig.pl

wody transportującej ciepło z formacją skalną. Na skutek długotrwałej eksploatacji lub wystąpienia specyficznych uwarunkowań w strefach przyotworowych odwiertów geotermalnych może dochodzić do powstawania stref kolmatacji, czyli obniżenia przepuszczalności formacji skalnej, powodującej zmniejszoną wydajność produkcji wody w przypadku odwiertów produkcyjnych lub utrudnione jej zatłaczanie w przypadku odwiertów chłonnych.

W celu zwiększenia przepuszczalności skały w strefie przyodwiertowej stosuje się zabiegi intensyfikacyjne, najczęściej kwasowania matrycowego lub hydraulicznego szczelinowania⁵⁾. W ich efekcie można uzyskać poprawę przepuszczalności matrycy skalnej w strefie kolmatacji i tym samym wydajniejszy przepływ medium roboczego pomiędzy otworem zatłaczającym a produkcyjnym. Zabiegi hydraulicznego szczelinowania (HF) z materiałem podsadzkowym (proppantem) w otworach geotermalnych wykonuje się zwykle w odpowiedzi na powstanie znacznego uszkodzenia pierwotnej przepuszczalności skały, w sytuacji, w której kwasowanie jest niewystarczająco efektywne. Dotyczy to także skał twardych o niskiej przepuszczalności, skał zbudowanych z minerałów słabo reagujących z kwasami oraz występowania strefy kolmatacji w dalszej odległości od otworu wiertniczego. Technologia HF w otworach geotermalnych jest bardzo zbliżona do tej stosowanej w złożach węglowodorów. HF polega na zatłoczeniu do otworu płynu szczelinującego pod ciśnieniem wyższym niż ciśnienie szczelinowania formacji, powodując powstanie szczeliny indukowanej najczęściej w mechanizmie tensyjnym, a następnie jej propagację w górotworze w kierunku zgodnym z kierunkiem maksymalnego naprężenia horyzontalnego w ekstensyjnym reżimie tektonicznym^{6, 7)}. Do szczeliny jest wprowadzany materiał podsadzkowy, celem podparcia jej ścian i utrzymania przewodności po spadku ciśnienia poniżej ciśnienia zamknięcia szczeliny^{8, 9)}. Powstała w ten sposób sztucznie wytworzona szczelina wypełniona podsadzką umożliwia efektywniejszy przepływ medium roboczego pomiędzy otworami chłonnym i produkcyjnym, omijając strefę kolmatacji w górotworze.

Dobranie odpowiedniego materiału podsadzkowego do konkretnej formacji skalnej, zalegającej na danej głębokości, przy danym naprężeniu pionowym oraz danej temperaturze, ma kluczowe znaczenie dla powodzenia zabiegu HF. Materiały podsadzkowe można podzielić na 3 główne

grupy: piasek kwarcowy, materiał podsadzkowy ceramiczny oraz podsadzkę z ziarnami dodatkowo pokrytymi żywicą^{8, 10, 11)}. Najczęściej do zabiegów szczelinowania na niewielkich głębokościach, gdzie główne naprężenie pionowe jest relatywnie małe, stosuje się piasek kwarcowy, którego głównym składnikiem jest krystaliczna krzemionka (kwarc) SiO_2 , stanowiąca ok. 80–99,8% podsadzki. Materiał ten jest tani, a dostęp do niego łatwy. Jednakże jego stosowanie ogranicza się jedynie do niewielkich głębokości, ze względu na niską odporność na ciśnienie efektywne pochodzące z naprężeń ściskających¹²⁾. Stosowanie piasku zaleca się tylko do wartości ciśnienia przekraczającej 41,37 MPa. Przy wyższych ciśnieniach rekomenduje się ceramiczny materiał podsadzkowy o wyższej wytrzymałości. Najczęściej produkowany jest on ze spieku boksytu, kaolinu, krzemianu magnezu lub mieszanek boksytu i kaolinu. Oprócz znacznie wyższej wytrzymałości na ściskanie jest on także bardziej jednorodny pod względem wielkości i kształtu oraz charakteryzuje się większą kulistością i okrągłością ziaren, co zmniejsza opory przepływu w formacji i pozytywnie wpływa na przewodność szczeliny. Materiały ceramiczne ze względu na gęstość nasypową klasyfikuje się na^{8, 10, 11, 13)}: (i) ultralekkie ULWCP (*ultra-light weight ceramic proppants*) poniżej 1,30 g/cm³, (ii) lekkie LWPC (*light weight proppant ceramic*) o gęstości nasypowej w zakresie 1,40–1,70 g/cm³, (iii) o średniej wytrzymałości ISPC (*inter strength proppant ceramic*) 1,70–1,90 g/cm³, (iv) o wysokiej wytrzymałości HSPC (*high strength proppant ceramic*) 1,90–2,10 g/cm³, i (v) o ultrawysokiej wytrzymałości UHSPC (*ultra-high strength proppant ceramic*) powyżej 2,10 g/cm³. Zawartość tlenku glinu Al_2O_3 pozytywnie koreluje z wytrzymałością granulatu i gęstością materiału podsadzkowego. Ultralekkie podsadzki ceramiczne charakteryzują się zawartością tlenku glinu Al_2O_3 (korundu) na poziomie 5–35%, podsadzki z grupy LWPC 45–50%, ISPC 70–75%, a HSPC 80–85%. Pozostałymi składnikami wchodzącymi w skład ceramicznych materiałów podsadzkowych mogą być takie materiały, jak ditlenek krzemu SiO_2 , ditlenek tytanu TiO_2 i tritlenek żelaza Fe_2O_3 . Największą zawartością tlenku glinu (ok. 100%) charakteryzują się podsadzki z grupy UHSPC. Oprócz podsadzek kwarcowych i ceramicznych stosuje się także podsadzki dodatkowo pokryte powłoką żywiczną. Do tego celu używa się takich substancji, jak żywice epoksydowe, furan, poliestry, estry winylowe i poliuretany^{14, 15)}. Powłoki żywiczne stosuje się najczęściej w celu poprawienia parametrów sferycznych ziaren piasku (kulistość i krągłość) w podsadzkach kwarcowych oraz ograniczenia wymywania ziaren ze szczeliny podczas niekorzystnego zjawiska *flowback*.

Podsadzkę do zabiegu HF dobiera się na podstawie konkretnych warunków geologiczno-złożowych interwału perforacji oraz wyników laboratoryjnych badań podstawowych właściwości konkretnej partii produkcyjnej podsadzki. Podstawowe właściwości podsadzki, takie jak jej gęstość oraz parametry sferyczne determinują jej efek-



Dr inż. Marek CZUPSKI (ORCID: 0000-0002-6151-8044) w roku 1997 ukończył studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza. W 2008 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH w Krakowie. Jest kierownikiem Zakładu Stymulacji Wydobywania Węglowodorów w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym. Specjalność – intensyfikacja wydobywania węglowodorów.

tywny transport z powierzchni, przez armaturę otworową i perforację do utworzonej szczeliny. Użyta podsadzka powinna przede wszystkim zapewnić optymalną rozwarłość wygenerowanym szczelinom w złożu dla uzyskania zakładanej w projekcie HF przewodności. Dlatego powinna ona charakteryzować się obojętnością chemiczną, jednorodnym rozkładem uziarnienia, małym ciężarem właściwym (zbliżonym do wody), wysoką kulistością i krągłością ziaren (sferycznością), małą zawartością zanieczyszczeń (w jednostkach FTU, *formazin turbidity units*), słabą rozpuszczalnością w mieszaninie kwasów (HCl/HF), odpowiednio wysoką wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie, brakiem deformacji ziaren, stabilnością termiczną, oporem podczas procesu wymywania *flowback*, a dodatkowo łatwą dostępnością oraz niską ceną¹⁶⁾.

Istotnym elementem przy wyborze podsadzki w geotermii jest także określenie przewodności cieplnej λ warstwy wypełnionej podsadzką. Wyższa przewodność cieplna podsadzki powoduje bardziej efektywne nagrzewanie się wody podczas przepływu przez warstwę podsadzki. Pomiar tego parametru jest utrudniony ze względu na występowanie pomiędzy ziarnami podsadzki wolnych przestrzeni tworzących porowatość dostępną dla przepływu medium roboczego. Dlatego też do wstępnej oceny przewodności cieplnej można częściowo posłużyć się dostępną wiedzą dla poszczególnych minerałów wchodzących w skład danej podsadzki. Dla kwarcu przewodność cieplna λ mieści się w przedziale 6,5–11,30 W/(m·K)¹⁷⁾. Dla tlenku glinu wykorzystywanego w materiałach ceramicznych λ wynosi 19–35 W/(m·K)^{18, 19)}. Tlenek krzemu wykazuje λ ok. 1,4 W/(m·K)¹⁹⁾. Tlenek tytanu charakteryzuje się λ ok. 11 W/(m·K)¹⁹⁾, a tlenek żelaza(III) 0,5–1,0 W/(m·K). Ze względu na zróżnicowanie parametru λ , przy ocenie ceramicznego materiału podsadzkowego pod kątem przewodności cieplnej warto zwrócić także uwagę na procentową ilość znajdujących się w jego składzie minerałów, a w szczególności tlenku glinu.

Podstawowe właściwości materiałów podsadzkowych stosowanych w zabiegach hydraulicznego szczelinowania

W celu stwierdzenia, czy dana podsadzka może być stosowana do zabiegów hydraulicznego szczelinowania w określonym interwale złoża, wykonuje się specjalistyczne testy laboratoryjne jej podstawowych właściwości.

Oznacza się skład granulometryczny, który pozwala na wyznaczenie podwyższonej zawartości nadziarna i podziarna. W normach²⁰⁻²³⁾ podane jest, że co najmniej 90% próbki podsadzki powinno zawierać się w granicach granulacji przyjętej w projekcie HF. Przykładowo dla podsadzki o granulacji 850/425 μm minimum 90% całkowitej jej masy powinno znajdować się pomiędzy rozmiarem ziaren 850 μm a 425 μm . Ponadto w normach^{22, 23)} podane jest, że nie więcej niż 0,1% ziaren podsadzki może być większa

niż 1180 μm i nie więcej niż 2,0% może być mniejsze niż 425 μm . Z kolei w normach^{20, 21)} podane jest, że nie więcej niż 1,0% ziaren może być w rozmiarze 300 μm . Niewielkie przekroczenie wielkości zalecanych przez normę nie jest równoznaczne z nieprzydatnością tej podsadzki do HF. Jest to natomiast istotna informacja dla projektującego zabieg.

Wyznaczana jest średnia średnica ziarna d_{av} , która charakteryzuje średni rozkład ziaren podsadzki, a także przeprowadzana jest wizualna ocena kształtu ziaren (kulistość i krągłość) służąca do określania charakterystyki podsadzki. Kulistość jest miarą stopnia zbliżenia kształtu ziarna do kształtu kuli. Im jest on bardziej zbliżony do kształtu kuli, tym kulistość jest wyższa. Krągłość jest miarą względnej ostrości (zaokrąglenia) krawędzi ziarna lub krzywizny kształtu. Przy ziarnach o łagodnych krawędziach krągłość jest duża, natomiast dla ziaren ostrokrawędzistych jest ona mała. Jest to ocena subiektywna, gdyż polega na porównywaniu oglądanych pod mikroskopem kształtów ziaren podsadzki z kształtami zilustrowanymi na wzorcowym diagramie Krumbeina i Slossa w normach^{20, 21)}. W normach podane są także procedury badawcze oraz kryteria kulistości i krągłości. Kulistość i krągłość dla podsadzki ceramicznej oraz dodatkowo pokrytej powłoką żywicy nie powinna być mniejsza niż 0,7. Dla pozostałych rodzajów materiałów podsadzkowych nie powinna być mniejsza niż 0,6.

Rozpuszczalność materiału podsadzkowego w mieszaninie kwasów $S_{12,3}$ stosuje się do określenia ilości znajdujących się w nim rozpuszczalnych materiałów (np. węglanów, skaleni, tlenków żelaza, gliny, miki i ilów). Jako mieszaninę kwasów stosuje się 12-proc. roztwór kwasu solnego (HCl) i 3-proc. kwasu fluorowodorowego (HF). Zarówno sposób przygotowania mieszaniny kwasów HCl/HF, wykonanie testów oraz obliczenia opisane są w normach²⁰⁻²³⁾. Podana jest w nich także maksymalna dopuszczalna rozpuszczalność piasku oraz podsadzki pokrytej powłoką żywicy w mieszaninie kwasów HCl/HF (parametr $S_{12,3}$). Wartości te wynoszą maksymalnie 2,0% dla rozmiaru granulacji ziaren większej lub równej 600/300 μm oraz maksymalnie 3,0% dla granulacji mniejszej niż 600/300 μm . Dla podsadzki ceramicznej oraz dodatkowo pokrytej powłoką żywicy wynosi maksymalnie 7,0%.

Badanie ubytku masy w wyniku wypalania materiału podsadzkowego pokrytego powłoką żywicy ma na celu określenie ilości materiału palnego pokrywającego materiał podsadzkowy. Procedura badawcza, aparatura oraz metoda obliczeń są opisane w normach²⁰⁻²³⁾.

Zawartość zanieczyszczeń (zmętnienie) materiału podsadzkowego określa optyczne właściwości zawiesiny w wyniku rozproszenia światła przez cząstki fazy stałej zawieszonyj w płynie. Im większe jest zmętnienie roztworu, wyrażone liczbą FTU określającą stopień zmętnienia, tym większa liczba drobnych stałych cząstek jest obecna w zawieszynie. Normy, oprócz pomiaru w jednostkach FTU, dopuszczają pomiar w jednostkach NTU (*nephelometric turbidity unit*). Badania wykonuje się na podstawie pro-

cedury pomiarowej opisanej w normach^{20–23}), w których podane jest, aby zmętnienie zdemineralizowanej wody nie przekraczało wartości 250 FTU (NTU).

Gęstość nasypowa ρ_{bulk} opisuje, jaka jest masa podsadzki wypełniająca jednostkę objętości, a tym samym uwzględnia ona zarówno sam materiał, jak i jego porowatość oraz przestrzeń między ziarnami podsadzki. Stosuje się ją w celu określenia masy materiału podsadzkowego do transportu oraz magazynowania. Do określania gęstości nasypowej stosuje się procedurę badawczą wraz z odpowiednio wykalibrowaną i zwymiarowaną aparaturą zgodnie z normami^{20–23}.

Gęstość pozorną ρ_{ap} mierzy się w cieczy o małej lepkości, nieprzekraczającej 5 cP, która zwilża powierzchnię podsadzki dostępną dla płynu. Wyznacza się ją w temperaturze otoczenia, zgodnie z procedurą badawczą i za pomocą aparatury opisanej w normach.

Odporność na naprężania ściskające jest najważniejszą właściwością materiału podsadzkowego. Określa się ją jako ilość skruszonej podsadzki podczas właściwego testu jej zgniatania. Test ten wykorzystuje się do porównywania odporności podsadzek na zniszczenie. Ocena wyników badań wytrzymałościowych podsadzki powinna dostarczać wskazówek dotyczących poziomu naprężeń, w którym ulega ona nadmiernemu kruszeniu. Należy także zaznaczyć, że wyznaczona odporność ziaren materiału podsadzkowego na zgniatanie wg procedury zaproponowanej przez normy dotyczy ciśnienia statycznego. Pomiar przeprowadza się poprzez stopniowe zwiększanie naprężenia, aż do momentu gdy stopień skruszenia materiału podsadzkowego osiągnie 10% lub więcej. Analiza wytrzymałości materiału podsadzkowego nie uwzględnia faktycznych warunków naprężeniowych panujących w danej formacji złożowej. Tym samym pomija się tutaj wpływ temperatury, cieczy pozabiegowej, a także geometrię i strukturę materiału podsadzkowego oraz szczeliny. Wartość klasy zniszczenia materiału podsadzkowego przypisuje się na podstawie klasyfikacji znajdującej się w normach^{20–23}. Odpowiada ona maksymalnej wartości naprężenia powodującego zniszczenie nie więcej niż 10% podsadzki. W normie tej zostało zdefiniowanych 20 klas.

Badania tego typu mają na celu określenie wpływu temperatury i czasu działania naprężeń ściskających na odporność materiału podsadzkowego. Pozwalają na wyznaczenie ilości skruszonych ziaren podsadzki pod wpływem działania tych czynników.

Celem pracy było laboratoryjne wyznaczenie właściwości podsadzek ceramicznych z grupy lekkich LWPC oraz o średniej wytrzymałości na ściskanie ISPC i ocena ich przydatności pod kątem zastosowania w geotermii.

Część doświadczalna

Materiały

Podsadzki ceramiczne poddane analizie były wykonane z materiałów na bazie glinki kaolinowej i glinokrzemianu o wysokiej wytrzymałości. Zawierały śladowe ilości takich

składników, jak tlenki żelaza, metale alkaliczne i ziem alkalicznych (K, Ca, Mg), które determinują ich gęstość i specyficzne właściwości. Granulacja ziaren podsadzki wynosiła 850/425 μm , co odpowiadało rozmiarowi 20/40 mesh. Pierwszym badanym materiałem podsadzkowym była komercyjna lekka podsadzka ceramiczna, oznaczona jako LPC, którą przedstawiono na rys. 1A. Zawierała ona: Al_2O_3 (50%), SiO_2 (45%), TiO_2 (2%) i Fe_2O_3 (1%). Drugim materiałem była cięższa komercyjna podsadzka ceramiczna o średniej wytrzymałości na zgniatanie. Oznaczono ją jako ISPC i przedstawiono na rys. 1B. W porównaniu z pierwszą podsadzką zawierała więcej Al_2O_3 (73%), Fe_2O_3 (9%) i TiO_2 (3%) oraz mniejszą ilość SiO_2 (13%).

Metodyka badań

Badania wytrzymałościowe podsadzki w warunkach jednoosiowego ściskania wykonano na stanowisku badawczym wg schematu pokazanego na rys. 2. Komora wytrzymałościowa, o wewnętrznej średnicy 50,8 mm, wykonana była ze stali o wysokiej twardości (48 HRC). Dodatkowo wyposażona była w układ grzewczy z pomiarem temperatury. Procedurę przygotowania próbek oraz wykonania testów podstawowych właściwości materiałów podsadzkowych przeprowadzono na podstawie norm^{20–23}.

W pierwszym etapie badań wykonano analizę składu granulometrycznego podsadzki. W tym celu pobrano próbki o masie w przedziale 80–120 g, a następnie przesiano ją przez zestaw 7 sit wg norm^{20–24}). Rozmiary sit dobrane były zgodnie z normą dla granulacji podanej przez producenta. Próbkę podsadzki była wytrząsana na sitach przez okres 10 min. Następnie, w celu określenia odporności na kruszenie się ziaren pod wpływem naprężenia ściskającego, wykonano badania typu *crush test* dla podsadzki o granulacji 20/40 mesh. Próbkę przesiano przez zestaw 2 sit o rozmiarze otworów 850 μm i 425 μm . Z dolnego sita (425 μm) odważono masę m_s próbki. Masa próbki stosowana w teście wypełniała objętość cylindrycznej komory wytrzymałościowej do takiego poziomu, aby uzyskać obciążenie 1,953 g/cm² (odpowiadało to 4 lb/ft²) na obszarze tłoka o średnicy 50,8 mm. Dla cylindrycznej komory wytrzymałościowej o wewnętrznej średnicy 50,8 mm potrzebne było 24,7 cm³ podsadzki. Dla podsadzek o różnych gęstościach nasypowych wymagane są różne masy m_p , które określano zgodnie z normami^{20–23}), wg równania (1):

$$m_p = 24,7 \text{ cm}^3 \cdot \rho_{\text{bulk}} \quad (1)$$

w którym m_p oznacza masę próbki materiału podsadzkowego, g, ρ_{bulk} stanowi wyznaczoną gęstość nasypową podsadzki, g/cm³, a wartość 24,7 odpowiada objętości próbki podsadzki wymaganej do testu, cm³.

Z dolnego sita odważono masę m_s próbki podsadzki (równą masie m_p) i umieszczono wewnątrz cylindrycznej komory wytrzymałościowej wg schematu zaprezentowanego na rys. 2. Tak przygotowaną komorę z podsadzką zamykano tłokiem, a następnie umieszczano w prasie

Table. Crush test conditions for various compressive stresses, stress exposure time and temperature

Tabela. Warunki testu wytrzymałościowego typu *crush test* dla różnych wielkości naprężeń ściskających, czasu działania naprężenia oraz temperatur

Koncentracja powierzchniowa podsadzki, g/cm ² lub (lb/ft ²)	1,95 (4,0)			
Stała prędkość dochodzenia do zadanego naprężenia ściskającego, MPa/min	13,8			
Temperatura, °C	25	100		
Czas działania naprężania ściskającego podsadzki, min	2	120	2	120

hydraulicznej i poddawano działaniu zadanej wartości naprężenia ściskającego w temperaturze otoczenia, w przedziale 20–25°C. Siłę F_{tc} potrzebną do przyłożenia do komory wytrzymałościowej w celu uzyskania zadanego naprężenia (nacisku) na podsadzkę określono zgodnie z normami^[20–23], wg równania (2):

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

w którym F_{tc} oznacza siłę potrzebną do uzyskania zadanego nacisku, N, σ naprężenie działające na podsadzkę, MPa, a d_{cell} wewnętrzną średnicę komory wytrzymałościowej, mm.

Do momentu uzyskania zadanej wartości naprężenia działającego na podsadzkę dochodzono ze stałą szybkością 13,8 MPa/min. Po osiągnięciu zadanej wartości siły ściskającej kontynuowano nacisk na podsadzkę przez 2 min, a następnie zdejmowano naprężenie i wyciągano tłok z komory. Kolejno usuwano z komory pokruszoną podsadzkę i ponownie przesiewano ją przez zestaw wcześniej używanych 2 sit o rozmiarze 850 μm i 425 μm. Następnie określano masę okruszków, które przeszły przez sito 425 μm (okruszki znajdujące się w denku) po przesiewaniu (m_{pan}). Procentową masę zniszczonych ziaren materiału podsadzki (m'_{pan}) wyznaczano zgodnie z normami^[20–23], wg równania (3):

$$m'_{pan} = \frac{m_{pan}}{m_s} \cdot 100 \% \quad (3)$$

w którym m_{pan} oznacza masę cząstek ze skruszonych ziaren materiału podsadzki podczas badania, g, a m_s masę próbki materiału podsadzki użytej do badania, g.

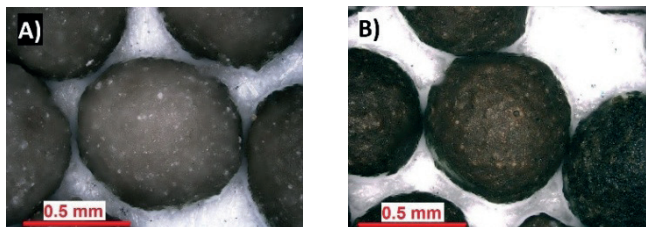


Fig. 1. Proppant materials with grains size 850/425 μm; A) light proppant ceramic LPC, B) inter strength proppant ceramic ISPC

Rys. 1. Materiały podsadzki o granulacji 850/425 μm; A) lekka podsadzka ceramiczna LPC, B) podsadzka ceramiczna o średniej wytrzymałości ISPC

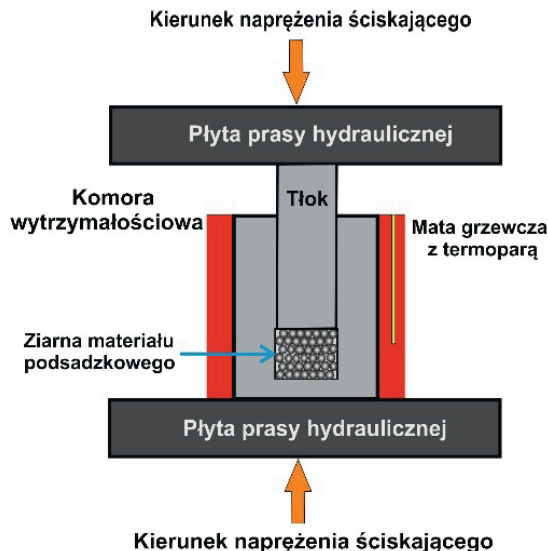


Fig. 2. Schematic diagram of the stand for testing the strength of proppant grains under compressive stress

Rys. 2. Schemat stanowiska do badania wytrzymałości ziaren materiału podsadzki na naprężenia ściskające

Jako wartość końcową przyjęto wartość średnią uzyskaną z 3 powtórzonych badań. Jako zakres badanych naprężeń działających na badaną podsadzkę w komorze przyjęto zakres podany w normach^[21–23]. Dla sztucznych materiałów podsadzki wynosi on minimum 34,5 MPa (5000 psi). Następnie na podstawie uzyskanych wyników testów wyznaczono klasę zniszczenia materiału podsadzki wg klasyfikacji zamieszczonej w tabeli 11 w normach^[20, 21].

Określono także wpływ temperatury i czasu działania naprężeń ściskających na kruszenie ziaren podsadzki. Do tego celu zastosowano taką samą procedurę badawczą jak w przypadku wcześniej omówionych testów wytrzymałościowych, z wyjątkiem wstępnego wygrzania próbki materiału podsadzki m_s wraz z komorą pomiarową w suszarce przez 24 h w temp. 100°C. Następnie próbkę podsadzki umieszczano w prasie hydraulicznej i poddawano działaniu zadanej wartości naprężenia ściskającego przez 120 min w temp. 100°C. Po tym okresie zdejmowano obciążenie i rozkręcano komorę. Otrzymane wyniki porównano z wartościami uzyskanymi podczas testów wytrzymałościowych w temperaturze otoczenia przy zadanym naprężeniu ściskającym przez 2 min. Pozwoliło to na określenie wpływu temperatury oraz czasu działania naprężenia ściskającego na kruszenie się ziaren. Testy wytrzymałościowe podsadzki wykonano na podstawie zaproponowanego schematu przedstawionego w tabeli.

Wyniki badań i ich omówienie

Przeprowadzone badania i analiza uzyskanych wyników obydwu analizowanych materiałów podsadzki o granulacji 850/425 μm wykazały, że spełniają one wszystkie kryteria stawiane materiałom podsadzkiemu w celu użycia

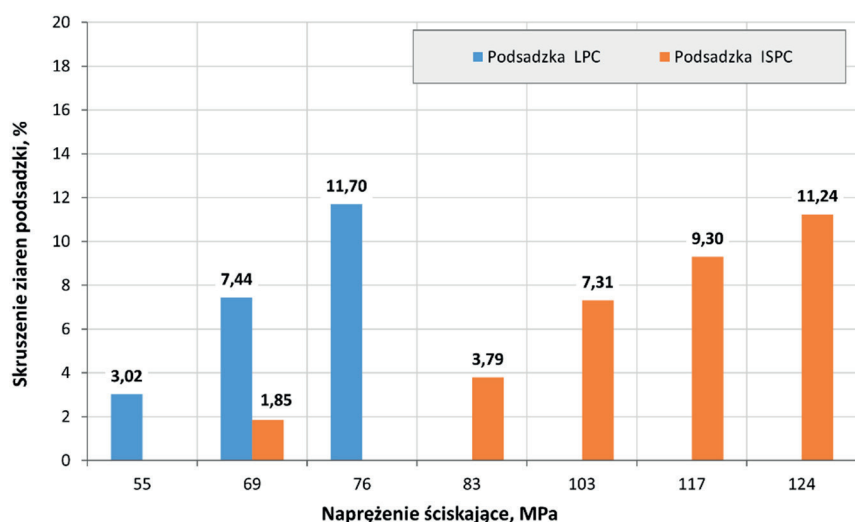


Fig. 3. Comparison of compressive strength tests results of ceramic proppant for a surface proppant concentration of 19.52 kg/m² at temp. 25°C, after 2 min of exposure

Rys. 3. Porównanie wyników wytrzymałości ceramicznych materiałów podsadzkowych na napężenia ściskające dla koncentracji powierzchniowej podsadzki 19,52 kg/m² w temp. 25°C, po 2 min

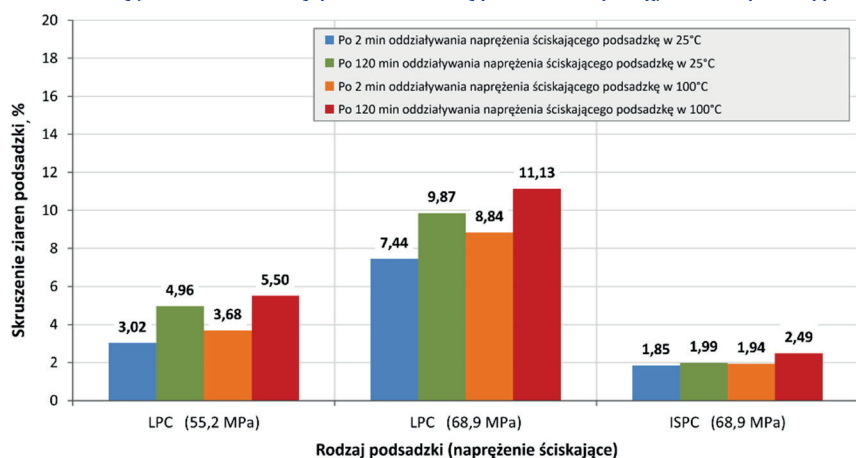


Fig. 4. Comparison of compressive strength tests results of ceramic proppant with grains size 850/425 μm for a surface proppant concentration of 19.52 kg/m² at temp. 25°C and 100°C, after 2 and 120 min of exposure

Rys. 4. Porównanie wyników wytrzymałości ceramicznych materiałów podsadzkowych o granulacji 850/425 μm na działanie naprężeń ściskających, dla koncentracji powierzchniowej podsadzki 19,52 kg/m² w temp. 25°C i 100°C, po 2 i 120 min ekspozycji

ich w zabiegach hydraulicznego szczelinowania, zgodnie z obowiązującymi normami²⁰⁻²³). Podsadzka oznaczona jako LPC charakteryzowała się średnią średnicą ziaren 777 μm. Analiza granulometryczna wykazała obecność 99,4% ziaren w przedziale 710–425 μm. Kulistość ziaren wynosiła 0,83, a krągłość 0,86. Rozpuszczalność w mieszaninie kwasów była mała i nie przekroczyła 1,9%. Równie mała była wartość zanieczyszczenia podsadzki (13,4 FTU). Z kolei gęstość nasypowa była równa 1,51 g/cm³, co przełożyło się na gęstość pozorną wynoszącą 2,61 g/cm³. Klasa odporności ziaren podsadzki na kruszenie wyniosła 10K.

Druga z analizowanych podsadzek, czyli ISPC, charakteryzowała się zbliżoną do podsadzki LPC średnią średnicą ziaren równą 737 μm, natomiast większa była jej gęstość

nasypowa (1,90 g/cm³) oraz gęstość pozorną (3,30 g/cm³). Zawartość ziaren o średnicy 710–425 μm wyniosła 97,1%. Charakteryzowały się one kulistością 0,85 i krągłością 0,87. Były to wartości zbliżone do wartości uzyskanych dla podsadzki LPC. Rozpuszczalność w kwasie była nieco wyższa (4,4%), a zmętnienie nieco mniejsze (10,9%). Dla tej podsadzki, o większej zawartości tlenu glinu, uzyskano znacznie wyższą klasę odporności równą 17K. Odporność na kruszenie ziaren badanych materiałów ceramicznych w zależności od wartości efektywnego napężenia ściskającego przedstawiono na rys. 3.

Uzyskane wartości jasno pokazują większą wytrzymałość ziaren podsadzki ISPC w porównaniu z podsadzką LPC. Dla poszerzonej oceny odporności ziaren na kruszenie wykonano testy obejmujące temperaturę podwyższoną do 100°C i wydłużony czas działania sił ściskających do 120 min dla napężenia ściskającego 55,2 MPa i 68,9 MPa. Wyniki tych badań zaprezentowano na rys. 4.

Wyniki testów wytrzymałościowych umożliwiły określenie odporności na zgniatanie badanych materiałów podsadzkowych przy 2 wartościach napężenia ściskającego w temp. 25°C i 100°C oraz wydłużeniu czasu ich działania do 120 min i tym samym na ocenę ich przydatności jako podsadzek, które mogą być używane w geotermii. Przeprowadzone testy w przybliżeniu odzwierciedlały warunki panujące w górotworze (ciśnienie, temperatura, napężenie), na jakie są narażone ziarna podsadzki wypełniające szczelinę podczas eksploatacji geotermii średnio- i wysokotemperaturowej. Należy

zwrócić uwagę na fakt, że podczas zatłaczania chłodnej cieczy do złoża z dużą wydajnością dochodzi do schłodzenia ziaren podsadzki. W dalszej odległości od otworu chłonnego ma miejsce wygrzewanie się cieczy w szczelinie od gorącej formacji skalnej. W wyniku ogrzewania ziaren podsadzki oraz dłuższego działania naprężeń ściskających górotworu może dochodzić do intensywnego kruszenia się ziaren, a tym samym zmniejszenia przewodności szczeliny. Zaprezentowane na rys. 4 wartości wskazują, że największe kruszenie się ziaren dotyczyło lekkiej podsadzki LPC. W przypadku rozpatrywanych 2 wartości napężenia ściskającego najmniejszy wpływ na intensywność kruszenia ziaren podsadzki miała temperatura. Z kolei dodatkowe wydłużenie czasu działania ciśnienia efektywnego na ziarna

podszadzki z 2 min do 120 min spowodowało zwiększenie się tego niekorzystnego zjawiska. Intensywniejsze kruszenie się ziaren lekkiej podszadzki ceramicznej miało miejsce podczas równoczesnego wygrzania podszadzki w 100°C i wydłużenia czasu działania obciążenia 55,17 MPa do 120 min. Spowodowało to wzrost wartości skruszenia ziaren z 3,02% do 5,50%, tym samym powodując zmianę jego wartości względnej o 82,2%. Z kolei największy wzrost wartości kruszenia ziaren z 7,44% do 11,13% (czyli zmianę wartości względnej o 49,6%) dotyczył naprężenia ściskającego równego 68,96 MPa. W tym wypadku otrzymana wartość przekraczała dopuszczalne 10%, stanowiące kryterium przy ocenie klasy podszadzki wg procedury i klasyfikacji zaproponowanej przez właściwe normy. Nieznaczne przekroczenie tej dopuszczalnej wartości nie eliminuje takiej podszadzki z zastosowania do HF, ale należy to odnotować podczas analizy przewodności warstwy podszadzki przeznaczonej do eksploatacji formacji geologicznej w geotermii wysokotemperaturowej. Z kolei w przypadku analizy drugiej podszadzki ISPC odnotowano jedynie nieznaczną zmianę wartości skruszenia ziaren z 1,85% na 2,49%, przy czym zmiana wartości względnej wyniosła 34,6%. Miało to miejsce podczas wstępnego 24-godzinowego wygrzania podszadzki i działania naprężenia ściskającego 68,96 MPa w 100°C przez 120 min.

Podsumowanie

Wyniki wykonanych testów 2 ceramicznych materiałów podszadzkowych o granulacji uziarnienia 850/425 µm, pozwoliły sformułować rekomendacje technologiczne dotyczące zastosowania w otworach geotermalnych. Dla warunków wysokotemperaturowych nieznacznie przekraczających 100°C i naprężenia efektywnego w górotworze w zakresie 55,2–68,9 MPa można rozważyć stosowanie podszadek ceramicznych z grupy o średniej wytrzymałości na ściskanie, charakteryzujących się gęstością nasypową w zakresie 1,70–1,90 g/cm³. W przypadku niższych temperatur i naprężeń bardziej wskazane wydaje się zastosowanie podszadek ceramicznych z grupy lekkich, czyli o małej gęstości nasypowej w zakresie 1,50–1,70 g/cm³. Testowana podszadzka ISPC charakteryzuje się znacznie większą zawartością tlenku glinu w porównaniu z podszadzką LPC, co wpływa na zwiększoną wytrzymałość ziaren na kruszenie oraz może powodować wyższą przewodność cieplną. Właściwości takie są korzystne dla utrzymania optymalnej przewodności szczeliny oraz lepszej wymiany w układzie woda-podszadzka-skała. Podszadzki ceramiczne mogą stanowić ciekawą alternatywę do użycia w geotermii, zastępując tradycyjne piaski kwarcowe. Ze względu na ich wyższą cenę i mniejszą dostępność ostateczna decyzja

w kwestii opłacalności należy do projektującego zabieg z ramienia inwestora.

Praca została zrealizowana dzięki środkom finansowym z Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, komunikat MNiSW z dnia 26.05.2025 r. Nr zlec. wew. INiG 0040/KS/25.

Otrzymano: 07-04-2026

Zrecenzowano: 13-04-2026

Zaakceptowano: 13-04-2026

Opublikowano: 25-05-2026

LITERATURA

- [1] M. Melikoglu, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, **76**, 485, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.082>.
- [2] NIK, Informacje o wynikach kontroli NIK „Wykorzystanie energii wód termalnych dla celów wytworzenia ciepła”, nr ewid. 145/2021/P/21/067/LKA, <https://www.nik.gov.pl/plik/id,25666,vp,28439.pdf>, dostęp 4.03.2026 r.
- [3] M. Ciechanowska, *Nafta-Gaz* 2024, nr 4, 243, DOI: 10.18668/NG.2024.04.06.
- [4] C.M. Nkinyam, C.O. Ujah, C.O. Asadu, D.V.V. Kallon, *Unconv. Resour.* 2025, **6**, 100149, <https://doi.org/10.1016/j.uncres.2025.100149>.
- [5] B. Kennedy, D. Blankenship, T. Doe, A. Riahi, B. Damjanac, A. Finnila, P. Fu, E. Sonnenthal, K. Baker, S. Ingebritsen, Performance Evaluation of Engineered Geothermal Systems Using Discrete Fracture Network Simulations, Technical Report LBNL-2001392, Lawrence Livermore National Laboratory, 2021, <https://escholarship.org/uc/item/4168d73x>, dostęp 4.03.2026 r.
- [6] R. Moska, K. Labus, P. Kasza, *Energies* 2021, **14**, 5725, <https://doi.org/10.3390/en14185725>.
- [7] R. Moska, K. Labus, P. Kasza, *Energies* 2025, **18**, 2869, <https://doi.org/10.3390/en18112869>.
- [8] M.J. Economides, K.G. Nolte, *Reservoir stimulation*, Wiley, Houston 2000.
- [9] J.K. Fink, *Hydraulic fracturing chemicals and fluids technology*, Gulf Professional Publishing, 2013.
- [10] M. Masłowski, *Nafta-Gaz* 2014, nr 2, 77.
- [11] M. Masłowski, M. Czupski, *Przegl. Górniczy* 2014, **70**, nr 12, 45.
- [12] M. Czupski, K. Wilka-Zajdel, *Przem. Chem.* 2023, **102**, nr 8, 807.
- [13] A.S. Ramlan, R.M. Zin, N.F.A. Bakar, N.H. Othman, *J. Petrol. Sci. Eng.* 2021, **205**, 108871, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108871>.
- [14] F. Liang, M. Sayed, G. Al-Muntasheri, F.F. Chang, Mat. Konf. SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, March 2015, Manama, Bahrain, <https://doi.org/10.2118/172763-MS>.
- [15] M. Zoveidavianpoor, A. Gharibi, *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2015, **24**, 197, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.03.024>.
- [16] F. Liang, M. Sayed, G.A. Al-Muntasheri, F.F. Chang, L. Li, *Petroleum* 2016, **2**, 26, DOI: 10.1016/J.PETLM.2015.11.001.
- [17] M. Plewa, S. Plewa, *Petrofizyka*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1992.
- [18] https://www.ceromit.pl/uploads/PDFy/Ceromit_Al2O3.pdf, dostęp 19.02.2026 r.
- [19] <https://ggs ceramic.com/pl/wiadomosc/10-materialow-ceramicznych-o-najlepszym-przewodnictwie-cieplnym>, dostęp 19.02.2026 r.
- [20] API Standard 19C:2018-08, *Measurement of and specifications for proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations*.
- [21] API Standard 19C:2018-08, ERRATA 1, *Measurement of and specifications for proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations*.
- [22] EN ISO 13503-2:2024, *Oil and gas industries including lower carbon energy. Completion fluids and materials. Part 2. Measurement of properties of proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations*.
- [23] PN-EN ISO 13503-2:2025-06, *Przemysł naftowy i gazowniczy, w tym energia niskoemisyjna. Płyny i materiały do dowiercania złóż. Cz. 2. Pomiar właściwości materiałów podszadzkowych używanych podczas zabiegów hydraulicznego szczelinowania oraz wykonywania obsypki zwirowej*.
- [24] ASTM 11-24, *Standard specification for wire cloth and sieves for testing purposes*.