

Opracowanie receptur zaczynów cementowych do uszczelniania otworów o podwyższonych temperaturach w rejonie Karpat

Development of cement slurries for sealing boreholes with elevated temperatures in the Carpathian region

Łukasz Kut

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Prace związane z wykonywaniem otworu wiertniczego o dużej głębokości (przekraczającej 3000 m) muszą uwzględnić specyficzne warunki panujące na jego spodzie, tj. temperaturę przekraczającą 90°C oraz ciśnienie powyżej 60 MPa. Tak trudne warunki otworowe nieraz przysparzały wiele problemów w czasie opracowywania odpowiednich składów zaczynów cementowych stosowanych podczas uszczelniania kolumn rur okładzinowych. Z roku na rok firmy wiertnicze wykonują coraz głębsze i bardziej skomplikowane otwory, przekraczające 3000 m, które podczas uszczelniania kolumny rur okładzinowych wymagają zastosowania specjalnie opracowanych receptur zaczynów uszczelniających. W przypadku znacznej głębokości otworu (na której panuje bardzo wysoka temperatura i ciśnienie) poważnym problemem jest zapewnienie długiego czasu przetłaczania zaczynu cementowego, który powinien charakteryzować się niską lepkością, niewielkim lub zerowym odstożem wody oraz jak najniższą filtracją. Należy zatem dobrać odpowiednie środki opóźniające, które są odporne na działanie wysokich temperatur, oraz dodatki zapewniające właściwe parametry technologiczne zaczynu i kamienia cementowego. Wraz ze wzrostem głębokości otworu wiertniczego wzrastają również parametry ciśnienia i temperatury. Wody złożowe (solanki o różnej mineralizacji) w dużym stopniu oddziałują na stwardniały zaczyn cementowy, dlatego zaczyny cementowe przeznaczone do dużych głębokości powinny zawierać w swoim składzie dodatki: podnoszące odporność termiczną, opóźniające wiązanie, obniżające filtrację oraz poprawiające odporność na korozję chemiczną wywołaną działaniem solanek złożowych. Celem badań laboratoryjnych było opracowanie innowacyjnych receptur zaczynów cementowych do uszczelniania otworów o podwyższonych temperaturach (do około 130°C), zarówno naftowych, jak i geotermalnych, w rejonie Karpat. Podczas realizacji tego tematu wykonywano badania laboratoryjne zaczynów cementowych oraz otrzymanych z nich kamieni cementowych. W związku z zainteresowaniem przemysłu pozyskiwaniem energii z innych źródeł niż ropa naftowa i gaz ziemny szerszym zakresem badań laboratoryjnych objęte zostały zaczyny cementowe do uszczelniania otworów geotermalnych o regulowanych parametrach reologicznych, które mogą być użyte w wysokich temperaturach złożowych do uszczelniania głębokich otworów wiertniczych. Zaczyny cementowe zarabiano wodą wodociągową z dodatkiem chlorku potasu w ilości 3%, 6% i 10% b/w (w stosunku do ilości wody). Do wody zarobowej dodawano kolejno środek odpieniający, regulujący czas wiązania i gęstnienia, upłynniający i obniżający filtrację. Zaczyny cementowe sporządzono z dodatkiem lateksu w ilości 10% i stabilizatora lateksu w ilości 1% b/w (oba składniki w stosunku do masy suchego cementu). Pozostałe składniki: mikro-cement (nanocement), mikrosilikę, hematyt i cement mieszano ze sobą i wprowadzano następnie do wody zarobowej. Wszystkie zaczyny cementowe sporządzano na bazie cementu wiertniczego G. Po połączeniu wszystkich składników zaczyn cementowy mieszano przez 30 minut, a następnie wykonywano pomiary laboratoryjne takie jak: gęstość, rozlewność, odczyty z aparatu Fann, odstój wody, filtrację, czas gęstnienia. Z opracowanych zaczynów cementowych wybrano te o najlepszych parametrach reologicznych, następnie sporządzono z nich próbki kamieni cementowych. Zaczyny cementowe wiązały przez 48 h w środowisku wysokiej temperatury i ciśnienia (warunki otworopodobne). Otrzymane kamienie cementowe poddano badaniu: wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na zginanie, przyczepności do rur stalowych oraz porowatości.

Słowa kluczowe: zaczyn cementowy, otwór geotermalny, kamień cementowy, parametry reologiczne, parametry mechaniczne, parametry technologiczne.

ABSTRACT: Works related to the drilling of a deep borehole must take into account the specific conditions at its bottom. This applies especially to high temperatures, exceeding 90–100°C, and pressures of 60–80 MPa. Such difficult downhole conditions have often posed many problems when developing appropriate compositions of cement slurries used for sealing columns of casing pipes. With each passing year, drilling companies make deeper and more complicated boreholes, more and more often exceeding 3000 m, which require the use of specially developed recipes of cement slurries when sealing the casing column. In deep boreholes (with very high temperature and pressure),

Autor do korespondencji: Ł. Kut, e-mail: lukasz.kut@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 20.11.2020 r. Zatwierdzono do druku: 03.03.2021 r.

a serious problem is to ensure a long pumping time of the cement slurry, which should be characterized by low viscosity, little or no free water and the lowest filtration possible. Therefore, it is necessary to select appropriate retardants that are resistant to high temperatures and additives ensuring the appropriate technological parameters of the slurries and cement stone. Pressure and temperature parameters increase with the depth of the borehole. Reservoir waters (brines of different mineralization) largely affect the hardened cement slurry, therefore cement slurries intended for deep boreholes should contain in their composition additives that increase thermal resistance, delay setting, lower filtration and improve resistance to chemical corrosion caused by the action of brines reservoir. The aim of the laboratory research was to develop innovative formulas of cement slurries for sealing boreholes, both crude oil and geothermal, with increased temperatures (up to about 130°C) located in the Carpathian region. During the implementation of the topic, laboratory tests were carried out on both cement slurries and cement stones obtained from them. Due to the industry's interest in acquiring energy from sources other than crude oil and natural gas, a broader scope of laboratory tests covered cement slurries for sealing geothermal boreholes with controlled rheological parameters, which can be used at high reservoir temperatures to seal deep boreholes. The cement slurries were prepared with tap water with the addition of potassium chloride in the amount of 3, 6 and 10% bwow (in relation to the amount of water). The following agents were successively added to the mixing water: defoaming, adjusting the setting and thickening time, plasticizing and reducing filtration. Cement slurries were made with the addition of 10% latex and a latex stabilizer in the amount of 1% bwoc (both components in relation to the weight of dry cement). The other ingredients: microcement (nanocement), microsilica, hematite and cement were mixed together and then added to the mixing water. All cement slurries were prepared on the basis of drilling cement G. When all components blended, the cement slurry was mixed for 30 minutes followed by laboratory measurements such as: density, fluidity, readings from the Fann apparatus, water retention, filtration, thickening time. From among the developed cement slurries, those with the best rheological parameters were selected, then samples of cement stones were prepared from them. Cement slurries were cured for 48 hours in an environment of high temperature and pressure (downhole conditions). The obtained cement stones were tested for: compressive strength, bending strength, porosity, adhesion of cement stone to steel pipes.

Key words: cement slurry, geothermal well, cement stone, rheological parameters, mechanical parameters, technological parameters.

Wprowadzenie

Firmy naftowe w ostatnich latach projektują i realizują w rejonie Karpat serię głębokich otworów, których końcowe głębokości przekraczają 3000 metrów. Temperatury dynamiczne panujące na dnie tych otworów dochodziły do 80–105°C, a ciśnienia do 60–70 MPa. W przypadku takich głębokości otworów (w których występuje wysoka temperatura i ciśnienie) poważnym problemem jest zapewnienie długiego czasu przetłaczania zaczynu cementowego, który powinien charakteryzować się niską lepkością, niewielkim odstojem wody oraz jak najniższą filtracją. Należy zatem dobrać odpowiednie środki opóźniające i upłynniające, które są odporne na działanie wysokich temperatur, oraz inne dodatki zapewniające prawidłowe parametry technologiczne zaczynu i kamienia cementowego (Rzepka i Kątna, 2006; Kremieniewski i Rzepka, 2009; Rzepka, 2010; Kremieniewski, 2012, 2013; Rzepka i Kremieniewski, 2017).

Rejon Karpat stał się również interesujący dla hydrogeologów już na początku XX wieku jako obiekt potencjalnych zbiorników wód podziemnych. Wody geotermalne stanowią alternatywę dla tradycyjnych źródeł energetycznych, tj. ropy naftowej i gazu ziemnego. Rejon Karpat, zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych, bogaty jest w zasoby energii geotermalnej niskotemperaturowej (temperatura poniżej 130°C) zawartej w wodach wglębnych, a związany jest głównie z basenami sedymentacyjnymi, zasobnymi też w złoża ropy naftowej i gazu ziemnego. Baseny sedymentacyjne zajmują ponad 50% powierzchni wszystkich kontynentów i są dobrze rozpoznane badaniami geofizycznymi i wierceniami wykonanymi przez przemysł naftowy, który prowadzi eksploatację złóż ropy naftowej od około

1853 roku, a gazu ziemnego od około 1900 roku. W basenach sedymentacyjnych, których na świecie istnieje około 194, złoża ropy i gazu zajmują 1–2% ich powierzchni, a złoża wód geotermalnych – około 98% (Sokołowski, 1999).

W rejonie południowo-wschodniej Polski w ostatnich latach okazało się, że najbardziej obiecujące pod względem zasobności w wody geotermalne są okolice Korczowej oraz Wiśniowej, gdzie odkryto obecność gorących wód na głębokościach przekraczających 3000 m. Temperatury wód geotermalnych w tych rejonach oscylują w granicach 85–120°C.

W INiG – PIB nie wykonywano do tej pory szczegółowych badań zaczynów cementowych o różnym stopniu zasolenia w temperaturze dynamicznej przekraczającej 90°C dla rejonu południowo-wschodniej Polski. Postęp prac wiertniczych w ostatnich latach sprawił, że zachodzi konieczność opracowania nowych receptur zaczynów cementowych do uszczelniania głębokich otworów, w szczególności geotermalnych. Ponadto wykonywanie otworów geotermalnych związane jest z występowaniem w przewiercanych formacjach wód termalnych o różnej mineralizacji. Obecność wód termalnych wymaga zastosowania do uszczelniania kolumny rur okładzinowych specjalnie opracowanych zaczynów cementowych zarabianych wodą o różnym stopniu zasolenia. Ze względu na duże zasoby oraz ogromny potencjał energetyczny, który znajduje się w wodach termalnych, zasadne jest prowadzenie prac związanych z udostępnianiem tych złóż. Specyficzne warunki otworowe oraz zróżnicowana mineralizacja wód w nich występujących podczas uszczelniania kolumny rur okładzinowych wymaga zastosowania specjalnie opracowanych innowacyjnych zaczynów uszczelniających, które utworzą szczelną i trwałą barierę z płaszczu cementowego.

Oprócz czynników wpływających na skuteczność uszczelniania rur okładzinowych w otworach wiertniczych, takich jak prawidłowe przygotowanie otworu, technologia wykonania zabiegu, podstawową rolę odgrywa zaczyn cementowy, który powinien cechować się określonymi właściwościami. Skład i parametry zaczynu uzależnione są przede wszystkim od warunków geologicznych oraz hydrogeologicznych otworu, w którym następuje proces wiązania i tworzenia się kamienia cementowego, od rodzaju przewierczanych skał, głębokości, temperatury i ciśnienia na dnie otworu wiertniczego. Podczas realizacji tematu wykonano badania szeregu zaczynów cementowych proponowanych do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w temperaturze dynamicznej

do 130°C (Nalepa, 2001; Hodne, 2007; Dębińska, 2012; Machowski et al., 2013).

Badania laboratoryjne

Badaniom laboratoryjnym poddano szereg różnych składów zaczynów cementowych, zaś w artykule zamieszczone wyniki badań wytypowanych składów zaczynów (dla których uzyskano najlepsze parametry reologiczne), jak i otrzymanych z nich kamieni cementowych sporządzanych na bazie wody o różnym stopniu zasolenia. Wybrane receptury mogłyby posłużyć do uszczelniania kolumn rur okładzinowych

Tabela 1. Parametry technologiczne wybranych zaczynów cementowych dla warunków otworowych 90°C i 60 MPa

Table 1. Technological parameters of selected cement slurries for downhole conditions of 90°C and 60 MPa

Ramowy skład zaczynu		ρ	Rozlewność	Filtracja	Cz _{g30}	Cz _{g100}	Ws ₂₈
[%]		[kg/m ³]	[mm]	[cm ³ /30 min]	[h:min]		[MPa]
Woda Odpianiacz Upłynniacz Dodatek antyfiltr. Opóźniacz KCl Stabilizator lateksu Lateks Hematyt Mikrosilika Cement wiertniczy G 100%	w/c = 0,45 0,3% bwoc 0,5% bwoc 0,3% bwoc 0,05% bwoc 3% bwow 1% bwoc 10% bwoc 10% bwoc 20% bwoc	1905	235	14	3:57	4:54	34,3
Temperatura 90°C/ciśnienie 60 MPa (nr 7)							
Woda Odpianiacz Upłynniacz Dodatek antyfiltr. Opóźniacz KCl Stabilizator lateksu Lateks Hematyt Mikrosilika Cement wiertniczy G 100%	w/c = 0,45 0,3% bwoc 0,7% bwoc 0,4% bwoc 0,07% bwoc 6% bwow 1% bwoc 10% bwoc 10% bwoc 20% bwoc	1910	235	14	5:48	6:51	40,6
Temperatura 90°C/ciśnienie 60 MPa (nr 10)							
Woda Odpianiacz Upłynniacz Dodatek antyfiltr. Opóźniacz KCl Stabilizator lateksu Lateks Hematyt Mikrosilika Cement wiertniczy G 100%	w/c = 0,5 0,3% bwoc 0,6% bwoc 0,4% bwoc 0,06% bwoc 10% bwow 1% bwoc 10% bwoc 20% bwoc 10% bwoc	1910	260	20	4:03	6:16	29,6
Temperatura 90°C/ciśnienie 60 MPa (nr 14)							

Oznaczenia:

ρ – gęstość zaczynu cementowego

Cz_{g30} – czas gęstnienia (30 Bc)

Cz_{g100} – czas gęstnienia (100 Bc)

Ws₂₈ – wytrzymałość kamienia cementowego na ściskanie po 28 dniach

w głębokich otworach wiertniczych w rejonie Karpat. Badania prowadzono dla trzech różnych warunków ciśnienia i temperatury, tj.: 90°C i 60 MPa, 110°C i 75 MPa oraz 130°C i 80 MPa. Zaczyny cementowe zarabiano wodą wodociągową z dodatkiem chlorku potasu w ilości 3%, 6% i 10% *bwow* (w stosunku do ilości wody). Do wody zarobowej dodawano kolejno środek regulujący czas wiązania, odpieniający, upłynniający i obniżający filtrację. Zaczyny cementowe sporządzono z dodatkiem lateksu w ilości 10% i stabilizatora lateksu w ilości 1% *bwoc* (oba składniki w stosunku do masy suchego cementu). Pozostałe składniki: mikrocement (nanocement), mikrosilikę, hematyt i cement mieszano ze sobą i wprowadzano następnie do wody zarobowej. Wszystkie zaczyny cementowe sporządzano na bazie cementu wiertniczego G (PN-EN ISO 10426-2).

Dla sporządzonych zaczynów cementowych wykonano następujące badania parametrów reologicznych: gęstość, rozlewność, odczyt z aparatu Fann, odstój wody, filtrację oraz czasy początku i końca gęstnienia. Opracowane próbki kamieni cementowych poddawano natomiast badaniom: wytrzymałości na ściskanie, zginanie, przyczepności do rur stalowych oraz porowatości.

Po sporządzeniu zaczynów cementowych zmierzono ich parametry reologiczne, a następnie z wybranych składów przygotowano próbki kamieni cementowych. Próbki wiązały w środowisku o określonej wyżej temperaturze i ciśnieniu (warunki otworopodobne). Następnie umieszczano je w autoklawach wykonanych ze stali nierdzewnej i przez cały okres sezonowania przetrzymywano w cieplarni. Otrzymane kamienie cementowe po założonych okresach poddawano badaniom laboratoryjnym.

W tabelach 1–5 i na rysunkach 1–6 przedstawiono szczegółowe wyniki badań parametrów technologicznych zaczynów i kamieni cementowych z wybranych receptur. W artykule zamieszczono wyniki badań dla dwóch wariantów warunków otworopodobnych: 90°C i 60 MPa oraz 110°C i 75 MPa. Przeprowadzone badania dla 130°C i 80 MPa wykazały, że opracowane receptury posiadały dobre parametry reologiczne, jednak otrzymane próbki kamieni cementowych po 28 dniach sezonowania miały niskie parametry mechaniczne i ich poprawa wymaga dalszych badań laboratoryjnych (Kut, 2011).

Niepewność uzyskanych wyników pomiarów zaprezentowanych poniżej oznaczono na podstawie klasy dokładności urządzeń pomiarowych na poziomie: dla pomiarów reologicznych – 0,2%, dla pomiarów wytrzymałości na ściskanie oraz przyczepność do rur – 0,4%.

Pierwsze badania wykonywano dla temperatury dynamicznej wynoszącej 90°C oraz ciśnienia 60 MPa, zadając symulowany czas dojścia do temperatury wynoszący 60 minut. Podczas sporządzania zaczynów cementowych wykorzystywano takie same składniki, jakie stosuje serwis cementacyjny podczas cementowania otworów wiertniczych w rejonie południowo-wschodniej Polski (tab. 1).

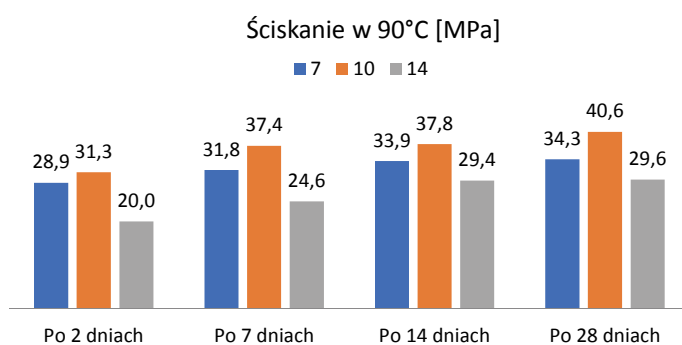
Tabela 2. Parametry mechaniczne kamieni cementowych dla warunków otworowych 90°C i 60 MPa

Table 2. Mechanical parameters of cement stones for downhole conditions of 90°C and 60 MPa

Nr	Temperatura 90°C			
	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]			
	po 2 dniach	po 7 dniach	po 14 dniach	po 28 dniach
7	28,9	31,8	33,9	34,3
10	31,3	37,4	37,8	40,6
14	20,0	24,6	29,4	29,6
Wytrzymałość na zginanie [MPa]				
7	12,0	12,0	10,5	10,5
10	10,5	11,3	12,0	12,0
14	10,5	11,3	10,5	10,5
Przyczepność do rur stalowych [MPa]				
7	4,6	5,1	4,9	7,5
10	3,8	4,0	4,6	4,9
14	3,2	2,8	2,9	3,0

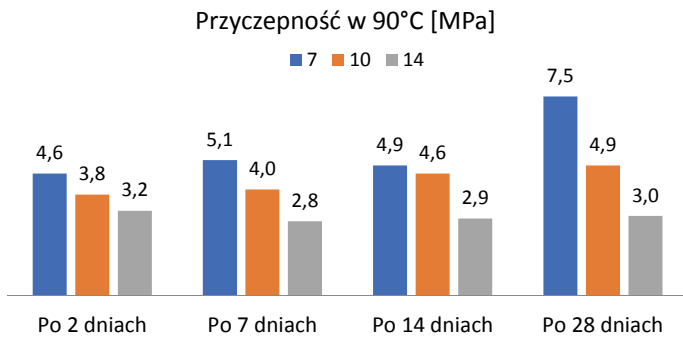
Receptury sporządzano przy dodatku 3%, 6% i 10% KCl. Zaczyny te miały gęstości od 1905 kg/m³ do 1910 kg/m³ oraz wyróżniały się brakiem odstojów wody. Wybrane receptury posiadały niskie filtracje, nieprzekraczające 20 cm³/30 min. Rozlewności wynosiły od 235 mm do 260 mm. Dla wytypowanych próbek otrzymano odpowiednie czasy gęstnienia w danych warunkach otworowych, osiągając początki gęstnienia (30 Bc) powyżej 3 h 50 min i więcej, zaś koniec gęstnienia (konsystencję 100 Bc) dla tych składów – poniżej 7 h. W tabeli 2 i na rysunkach 1–3 zamieszczono wyniki badań parametrów mechanicznych kamieni cementowych sezonowanych w 90°C.

Wykonane badania wytrzymałości na ściskanie w temperaturze 90°C wykazały jej wzrost po każdym okresie badań – po 28 dniach wynosiła ona od 29,6 MPa do 40,6 MPa, przy czym najmocniejsza była próbka nr 10, z zawartością 6% KCl, 10% hematytu i 20% mikrosiliki.



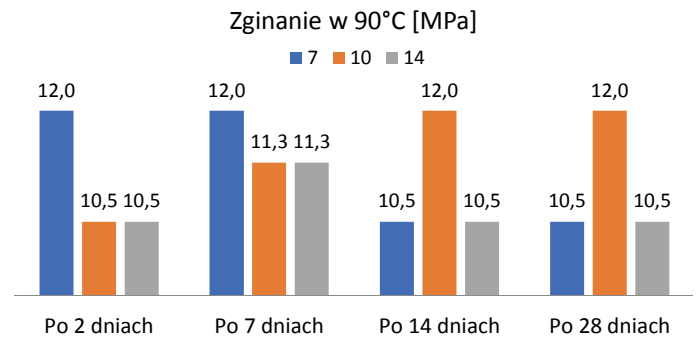
Rys. 1. Wytrzymałość kamieni cementowych na ściskanie w temperaturze 90°C

Fig. 1. Compressive strength of cement stones at 90°C



Rys. 2. Przyczepność kamieni cementowych do rur stalowych w temperaturze 90°C

Fig. 2. Adhesion of cement stones to steel pipes at 90°C



Rys. 3. Wytrzymałość kamieni cementowych na zginanie w temperaturze 90°C

Fig. 3. Bending strength of cement stones at 90°C

Tabela 3. Parametry technologiczne wybranych zaczynów cementowych w warunkach otworowych 110°C i 75 MPa

Table 3. Technological parameters of selected cement slurries for downhole conditions of 110°C and 75 MPa

Ramowy skład zaczynu		ρ	Rozlewność	Filtracja	Cz_{g30}	Cz_{g100}	Ws_{28}
[%]		[kg/m ³]	[mm]	[cm ³ /30 min]	[h:min]		[MPa]
Woda	w/c = 0,5	2080	245	12	6:44	7:25	24,3
Odpieniacz	0,3% bwoc						
Uplynniacz	1,0% bwoc						
Dodatek antyfiltr.	0,4% bwoc						
Opóźniacz	0,27% bwoc						
KCI	3% bwow						
Stabilizator lateksu	1% bwoc						
Lateks	10% bwoc						
Hematyt	50% bwoc						
Mikrosilika	20% bwoc						
Cement wiertniczy G 100%							
Temperatura 110°C/ciśnienie 75 MPa (nr 18)							
Woda	w/c = 0,55	2090	230	26	3:31	5:15	21,4
Odpieniacz	0,3% bwoc						
Uplynniacz	1,0% bwoc						
Dodatek antyfiltr.	0,5% bwoc						
Opóźniacz	0,24% bwoc						
KCI	6% bwow						
Stabilizator lateksu	1% bwoc						
Lateks	10% bwoc						
Hematyt	60% bwoc						
Mikrosilika	10% bwoc						
Cement wiertniczy G 100%							
Temperatura 110°C/ciśnienie 75 MPa (nr 23)							
Woda	w/c = 0,55	2030	235	30	6:11	6:28	26,5
Odpieniacz	0,3% bwoc						
Uplynniacz	1,0% bwoc						
Dodatek antyfiltr.	0,4% bwoc						
Opóźniacz	0,24% bwoc						
KCI	10% bwow						
Stabilizator lateksu	1% bwoc						
Lateks	10% bwoc						
Hematyt	50% bwoc						
Mikrosilika	10% bwoc						
Cement wiertniczy G 100%							
Temperatura 110°C/ciśnienie 75 MPa (nr 26)							

Oznaczenia:

ρ – gęstość zaczynu cementowego

Cz_{g30} – czas gęstnienia (30 Bc)

Cz_{g100} – czas gęstnienia (100 Bc)

Ws_{28} – wytrzymałość kamienia cementowego na ściskanie po 28 dniach

Drugim mierzonym parametrem mechanicznym kamieni cementowych była ich przyczepność do rur stalowych. Wykonane badania wykazały, że po 28 dniach wartości przyczepności do rur stalowych dla temperatury 90°C wynosiły od 3,0 MPa do 7,5 MPa, a najmocniejsza była próbka nr 7, z zawartością 3% KCl, 10% hematytu i 20% mikrosiliki.

Trzecim i ostatnim badaniem, którego wyniki zamieszczono w tabeli 2, były pomiary odporności kamieni cementowych na zginanie. Dla wszystkich przebadanych próbek po 28 dniach ich sezonowania otrzymano zbliżone wartości wynoszące od 9,0 MPa do 12,0 MPa.

Kolejne badania wykonano dla temperatury dynamicznej wynoszącej 110°C oraz ciśnienia 75 MPa, zadając symulowany czas dojścia do temperatury wynoszący 90 minut (tabela 3).

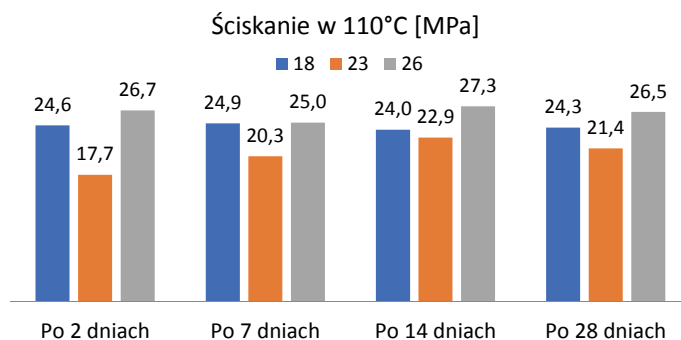
Również dla tych warunków otworowych receptury sporządzano z dodatkiem 3%, 6% i 10% KCl. Zaczyny te miały gęstości od 2030 kg/m³ do 2090 kg/m³. Odstój wody wynosił zero. Wszystkie receptury posiadały niskie filtracje, wynoszące od 12 cm³/30 min do 30 cm³/30 min. Rozlewności wynosiły od 230 mm do 245 mm, co świadczy o dobrej płynności zaczynów cementowych. Opracowane receptury posiadały odpowiednie czasy gęstnienia, konsystencję 30 Bc uzyskiwały powyżej 3 h 30 min, a 100 Bc (koniec gęstnienia – brak przetłaczalności) poniżej 7 h 30 min. W tabeli 4 i na rysunkach 4–6 zamieszczono wyniki badań parametrów mechanicznych kamieni cementowych sezonowanych w 110°C.

Próbki kamieni cementowych sezonowanych w 110°C cechowały się nieznacznie niższymi wartościami wytrzymałości na ściskanie niż te opracowane dla temperatur 90°C i po 28 dniach wynosiły od 21,4 MPa do 26,5 MPa. Po 28 dniach

Tabela 4. Parametry mechaniczne kamieni cementowych w warunkach otworowych 110°C i 75 MPa

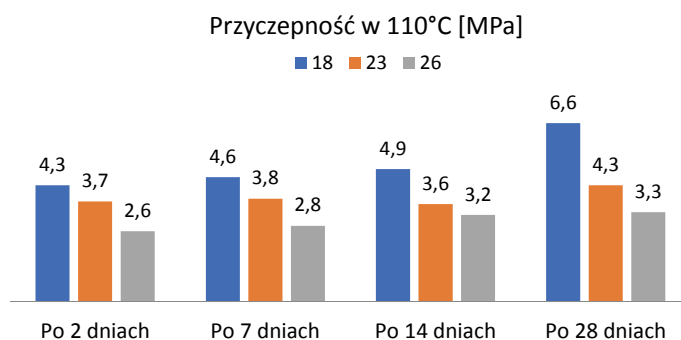
Table 4. Mechanical parameters of cement stones for downhole conditions of 110°C and 75 MPa

Nr	Temperatura 110°C			
	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]			
	po 2 dniach	po 7 dniach	po 14 dniach	po 28 dniach
18	24,6	24,9	24,0	24,3
23	17,7	20,3	22,9	21,4
26	26,7	25,0	27,3	26,5
Wytrzymałość na zginanie [MPa]				
18	10,5	11,3	12,0	12,0
23	9,0	9,8	11,3	11,3
26	9,0	9,0	9,8	9,8
Przyczepność do rur stalowych [MPa]				
18	4,3	4,6	4,9	6,6
23	3,7	3,8	3,6	4,3
26	2,6	2,8	3,2	3,3



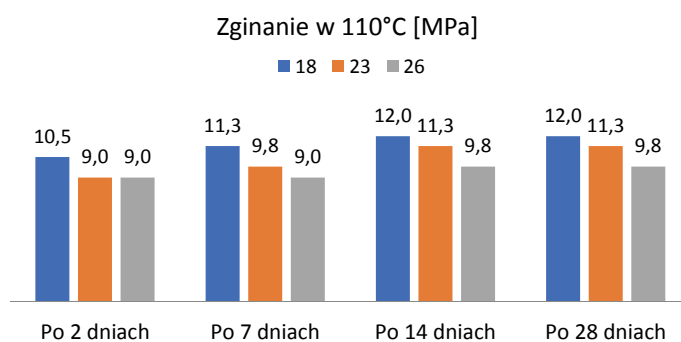
Rys. 4. Wytrzymałość kamieni cementowych na ściskanie w temperaturze 110°C

Fig. 4. Compressive strength of cement stones at 110°C



Rys. 5. Przyczepność kamieni cementowych do rur stalowych w temperaturze 110°C

Fig. 5. Adhesion of cement stones to steel pipes at 110°C



Rys. 6. Wytrzymałość kamieni cementowych na zginanie w temperaturze 110°C

Fig. 6. Bending strength of cement stones at 110°C

spośród próbek sezonowanych w 110°C najmocniejsza okazała się ta z zawartością 10% KCl, 50% hematytu i 10% mikrosiliki, a jej wytrzymałość wyniosła 26,5 MPa (próbka nr 26).

Drugim mierzonym parametrem mechanicznym kamieni cementowych była ich przyczepność do rur stalowych. Wykonane badania wykazały, że po 28 dniach wartości przyczepności do rur stalowych dla temperatury 110°C były porównywalne do tych zmierzonych dla temperatury 90°C, a najmocniejsza okazała się próbka nr 18, z zawartością 3% KCl, 50% hematytu i 20% mikrosiliki, dla której uzyskano wartość 6,6 MPa.

Ostatnim badaniem, którego wyniki zamieszczono w tabeli 4, były pomiary odporności kamieni cementowych na zginanie. Dla wszystkich przebadanych próbek po 28 dniach sezonowania otrzymano zbliżone wartości, wynoszące od 9,0 MPa do 12,0 MPa.

Ostatnim etapem było wykonanie badań porowatości wybranych próbek kamieni cementowych przy użyciu porozyometru rtęciowego po 28 dniach ich sezonowania. Porowatości wszystkich próbek mieściły się w przedziale od 33,7% do 40,3%. Najniższą porowatość po 28 dniach posiadała próbka otrzymana ze składu nr 10, która zawierała 10% hematytu, 20% mikrosiliki oraz 6% KCl. Wskaźnik w/c wynosił 0,45. Najwyższą z kolei porowatość odnotowano w przypadku próbki nr 14, zawierającej 20% hematytu, 10% mikrosiliki oraz 10% KCl, o wskaźniku wodno-cementowym w/c wynoszącym 0,5. W tabelach 5 i 6 przedstawiono wyniki badań dla

wybranych próbek kamieni cementowych. Zgodnie z otrzymanymi wynikami największą ilość stanowią pory z przedziału wielkości 10 000–100 nm – od 70% do 95%.

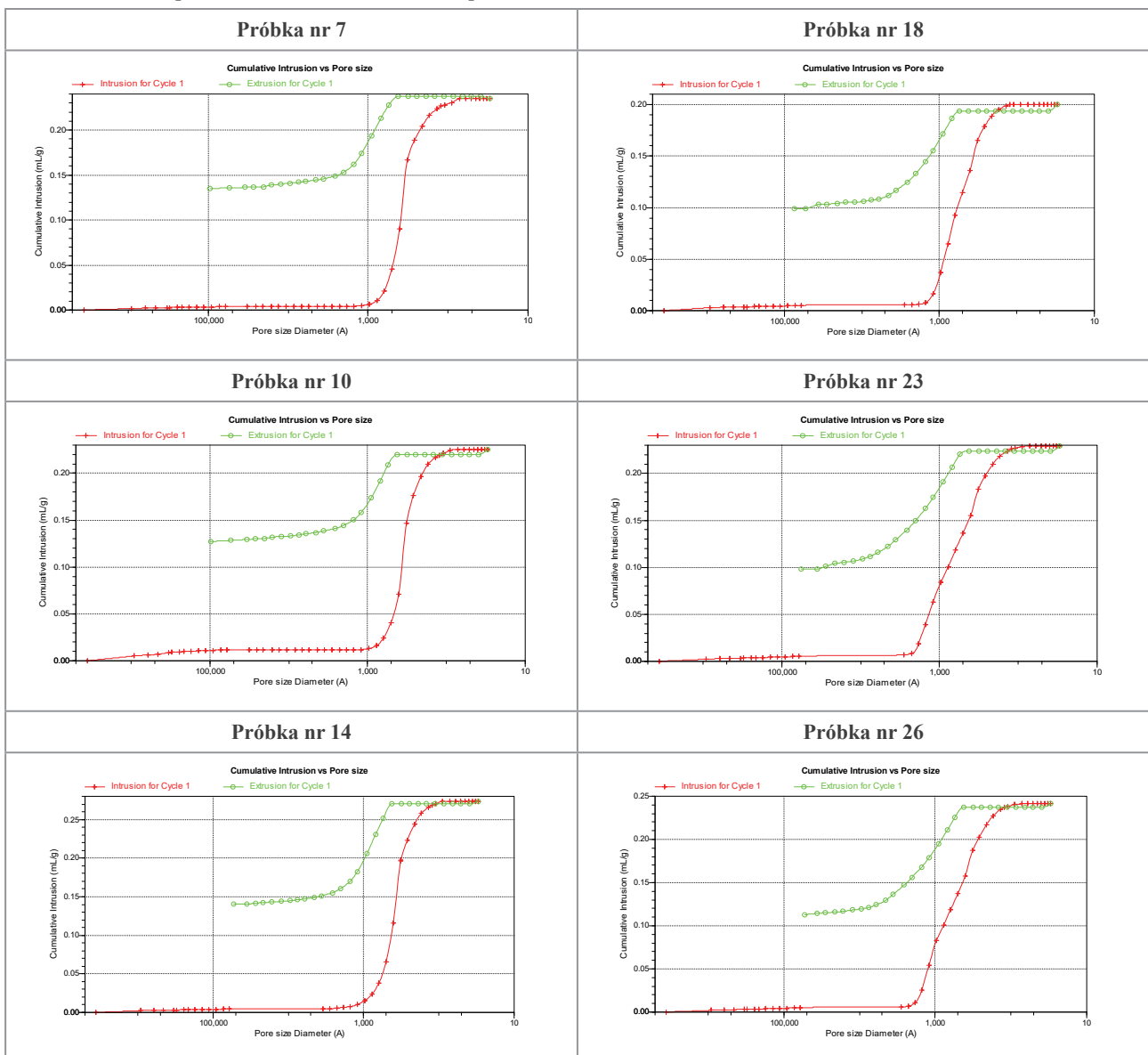
Tabela 5. Porowatości wybranych próbek kamieni cementowych po 28 dniach ich sezonowania

Table 5. Porosity of selected samples of cement stones after 28 days of sample seasoning

Nr próbki	Porowatość [%]
7	35,7
10	33,7
14	40,3
18	34,3
23	38,9
26	39,2

Tabela 6. Wykresy rozkładów porów w wybranych próbkach

Table 6. Charts of pore distribution in selected samples



Podsumowanie i wnioski

1. Na podstawie przeprowadzonych badań wytypowanych składów zaczynów cementowych można wyciągnąć następujące wnioski: W wyniku badań laboratoryjnych opracowano receptury zaczynów uszczelniających dla temperatury dynamicznej około 90–110°C i ciśnienia około 60–75 MPa. Zaczyny te zarabiane były wodą zasoloną chlorkiem potasu w ilościach 3%, 6% i 10%.
2. Opisane w artykule zaczyny cementowe posiadały gęstości od 1905 kg/m³ do 2090 kg/m³ i zostały opracowane z myślą o zastosowaniu ich podczas uszczelniania kolumn rur okładzinowych głównie w rejonie Karpat.
3. Parametry technologiczne opracowanych zaczynów cementowych można było z powodzeniem regulować dodatkami powszechnie stosowanymi w krajowym przemyśle wiertniczym.
4. Zaczyny cementowe po użyciu odpowiednich proporcji środków chemicznych (do danych warunków otworopodobnych) charakteryzowały się dobrymi parametrami reologicznymi.
5. Żaden z przedstawionych zaczynów cementowych nie wykazał odstoju wody, zaś zmierzone filtracje wynosiły od 12,0 cm³/30 min (nr 18) do 30,0 cm³/30 min (nr 26).
6. Badania wykazały, że rozlewność mieściła się w przedziale od 230 mm (nr 23) do 260 mm (nr 14).
7. Czasy gęstnienia opracowanych zaczynów cementowych mieściły się w przedziale od około 4 godzin do około 7,5 godziny i można je z powodzeniem regulować za pomocą dodatku środka opóźniającego w ilości około 0,05–0,65%.
8. Kamienie cementowe powstałe po związaniu opracowanych zaczynów cechowały się wysokimi parametrami mechanicznymi głównie dla temperatur 90°C i 110°C. Już po 2 dniach wytrzymałość na ścislenie większości badanych próbek kamieni cementowych przekraczała 20 MPa, natomiast po 28 dniach hydratacji wytrzymałość na ścislenie osiągała nawet wartości około 40 MPa (próbka nr 10 – 90°C, 65 MPa i 6% KCl). Przyczepność kamienia cementowego do rur stalowych była również bardzo wysoka (po 2 dniach wynosiła około 2,6–4,6 MPa, a po 28 dniach wzrastała do około 3–7,5 MPa).
9. Przeprowadzone badania wytrzymałości kamieni cementowych na zginanie dla dwóch temperatur, 90°C i 110°C, wykazały, że zarówno po 2 dniach, jak i po 28 dniach sezonowania próbek zmierzone wartości mieściły się w przedziale od 9 MPa do 12 MPa.
10. Opracowane receptury zaczynów mogą znaleźć zastosowanie w procesie cementowania kolumn rur okładzinowych w warunkach wysokich temperatur i ciśnień złożowych w środowisku o różnym stopniu zasolenia, które to

warunki mogą występować podczas wierceń otworów sięgających głębokości 3500–5000 metrów.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Opracowanie zaczynów cementowych do uszczelniania otworów o podwyższonych temperaturach w rejonie Karpat* – praca INiG – PIB na zlecenia MNiSW; nr zlecenia: 0026/KW/2020, nr archiwalny: DK-4100-0014/2020.

Literatura

- Dębińska E., 2012. Ocena działania dodatków opóźniających czas wiązania zaczynów cementowych na podstawie badań laboratoryjnych. *Nafta-Gaz*, 4: 225–232.
- Hodne H., 2007. Rheological performance of cementitious materials used in well cementing. *Faculty of Science and Technology Department of Petroleum Engineering, Stavanger*.
- Kremieniewski M., 2012. Modyfikacja przestrzeni porowej kamieni cementowych. *Nafta-Gaz*, 3: 165–170.
- Kremieniewski M., 2013. Wpływ warunków hydratacji na strukturę przestrzenną kamieni cementowych. *Nafta-Gaz*, 1: 51–56.
- Kremieniewski M., Rzepka M., 2009. Wpływ procesu ogrzewania na reologię modyfikowanych zaczynów cementowych. *Nafta-Gaz*, 10: 775–781.
- Kut Ł., 2011. Wpływ mikrocementu na parametry zaczynu i kamienia cementowego. *Nafta-Gaz*, 12: 903–908.
- Machowski W., Machowski G., Białecka K., 2013. Ocena możliwości pracy dubletu geotermalnego na strukturze Wiśniowej koło Strzyżowa jako wynik modelowań dynamicznych. *Technika Poszukiwań Geologicznych*, 2: 95–104.
- Nalepa J., 2001. Problemy związane z cementowaniem głębokich otworów wiertniczych. *Symposium Naukowo-Techniczne, Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynierskich oraz hydrotechnice, Pila-Płotki*.
- Rzepka M., 2010. Zaczyny cementowe do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w głębokich otworach wiertniczych w temperaturze dynamicznej do ok. 120°C. *Nafta-Gaz*, 4: 274–279.
- Rzepka M., Kątna Z., 2006. Zaczyny cementowe z dodatkiem mikrocementu do uszczelniania rur okładzinowych w warunkach wysokich temperatur i ciśnień złożowych. *Nafta-Gaz*, 7–8: 364–369.
- Rzepka M., Kremieniewski M., 2017. Zaczyny cementowe do uszczelniania głębokich otworów wiertniczych. *Oil and Gas Engineering, Poltava National Technical University*, 2: 43–56.
- Sokołowski J., 1999. Możliwości zagospodarowania wód geotermalnych w trzech prowincjach Europy północno-zachodniej i centralnej stykających się w rejonie Krakowa. *Technika Poszukiwań Geologicznych*, 4–5: 77–97.

Akty prawne i dokumenty normatywne

- PN-EN ISO 10426-2 Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych. Część 2: Badania cementów wiertniczych.



Mgr inż. Łukasz KUT
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie
Technologii Wiercenia
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: lukasz.kut@inig.pl