

Badania statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynów cementowych o obniżonej gęstości przeznaczonych do uszczelniania otworów wiertniczych

Studies on static structural strength of reduced density cement slurries for sealing boreholes

Marcin Rzepka, Miłosz Kędzierski

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Prezentowany artykuł jest rozwinięciem zagadnień z zakresu technologii zaczynów uszczelniających dotyczących tzw. procesów żelowania (tj. narastania w zaczynach cementowych statycznej wytrzymałości strukturalnej w trakcie procesu wiązania). W zdecydowanej większości dotychczasowych publikacji w czasopismach naukowych i branżowych omawiano jedynie badania procesów żelowania zaczynów o tzw. normalnej gęstości, wynoszącej około 1800–1900 kg/m³. W niniejszym artykule skoncentrowano się na zagadnieniu narastania statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynów cementowych, których gęstość kształtuje się na poziomie 1450–1600 kg/m³. Analizując badania prowadzone na świecie należy podkreślić, że w procesie przeciwdziałania ewentualnym ekshalacjom gazowym z przestrzeni pierścieniowej tempo żelowania zaczynu cementowego odgrywa niezwykle istotną rolę. Dotyczy to zarówno zaczynów o normalnej, jak i o obniżonej gęstości. Po zabiegu wytłoczenia zaczynu poza rury okładzinowe znajduje się on początkowo w stanie płynnym i działa na złożę jako ciecz (poprzez wytworzone ciśnienie hydrostatyczne). Następnie po określonym czasie w zaczynie następuje budowa statycznej wytrzymałości strukturalnej SGS (ang. *static gel strength*), co powoduje stopniowy spadek ciśnienia hydrostatycznego. Proces ten trwa aż do momentu związania cementu. W Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym opracowano szereg receptur innowacyjnych zaczynów cementowych o obniżonej gęstości, do których wprowadzono dodatki nanokomponentów oraz polimeru wielkocząsteczkowego. Gęstość zaczynów obniżano za pomocą dodatku różnych koncentracji mikrosfer. Receptury lekkich zaczynów, które zawierały w odpowiedniej koncentracji wielkocząsteczkowy polimer o symbolu GS, a także te zawierające nanokomponenty w postaci n-SiO₂ i n-Al₂O₃ cechowały się bardzo korzystnym przebiegiem krzywej żelowania (tj. szybkim narastaniem statycznej wytrzymałości strukturalnej). Lekkie zaczyny cementowe o najkorzystniejszych parametrach, tj. krótkich czasach przejścia TT (ang. *transition time*), mogą znaleźć zastosowanie w procesie cementowania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych – zwłaszcza w warstwach słabo zwięzłych lub horyzontach o obniżonym gradiencie ciśnienia złożowego.

Słowa kluczowe: zaczyn cementowy, czas przejścia, migracja gazu, wiązanie cementu.

ABSTRACT: The presented article is an extension of the issues in the field of sealing slurries technology related to the so-called gelling processes (i.e. the build-up of static structural strength in cement slurries during the setting process). The vast majority of papers published in scientific and trade journals discussed only the study of the gelling of slurries with the so-called “normal” density of around 1800–1900 kg/m³. This article focuses on the issue of the build-up of static structural strength of cement slurries, the densities of which range from 1450–1600 kg/m³. Based on research conducted around the world, it can be concluded that the rate of gelling of the cement slurry plays an important role in the process of preventing possible gas exhalations from the annular space. This is the case with both normal and reduced density of slurry. The initially liquid cement slurry, when pumped out of the casing, acts as a liquid, creating a certain hydrostatic pressure on the deposit. Then, after some time, the period of building the static gel strength (SGS) starts, causing a gradual drop in hydrostatic pressure. This process continues until the cement sets. The Oil and Gas Institute – National Research Institute has developed a number of innovative recipes for cement slurries with reduced density, with added nanocomponent and high-molecular weight polymer additives. The densities of the slurries were lowered with the addition of various amounts of microspheres. The formulas of light slurries containing the high-molecular weight polymer marked as GS in an appropriate concentration and those containing n-SiO₂ and n-Al₂O₃ nanocomponents were characterized by a very advantageous course of the gelation plot (i.e. rapid static build-up of gel strength). Light cement slurries with the most advantageous parameters, i.e. short Transition Times (TT), can be used in the process of cementing casing columns in boreholes, especially in weakly compact layers or horizons with a reduced formation pressure gradient.

Key words: cement slurry, transition time, gas migration, cement setting.

Autor do korespondencji: M. Rzepka, e-mail: marcin.rzepka@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 30.12.2021 r. Zatwierdzono do druku: 02.03.2022 r.

Wprowadzenie

Zabieg cementowania rur okładzinowych można uznać za jeden z najistotniejszych etapów wykonywanych w trakcie całego procesu wiercenia otworu wiertniczego. Główną rolę w tym zabiegu odgrywa rodzaj użytego zaczynu cementowego (Stryczek i Gonet, 2001). Zaczyn cementowy po zatłoczeniu do otworu po pewnym czasie zaczyna wiązać, tworząc w przestrzeni pierścieniowej płaszcz cementowy. Proces wiązania i twardnienia zaczynu może trwać od kilku do kilkunastu godzin. Czas ten zależy od warunków panujących w otworze wiertniczym, a także od składu fizykochemicznego cementów i dodatków. Przebieg hydratacji i żelowania zaczynu cementowego jest złożonym procesem, który zachodzi po zmieszaniu cementu z wodą i dodatkami modyfikującymi parametry technologiczne (Neville, 2000; Ridi, 2010; Kurdowski, 2010, 2014). Podczas wiązania zaczynu cementowego zachodzi szereg reakcji chemicznych, które odgrywają zasadniczą rolę przy tworzeniu się struktury krystalicznej oraz w dalszej kolejności przy powstaniu odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej stwardniałego zaczynu cementowego.

Zaczyn cementowy tuż po wytłoczeniu go do przestrzeni pierścieniowej działa jak ciecz i utrzymuje stałe ciśnienie hydrostatyczne oddziałujące na horyzont produktywny, równoważąc ciśnienie złożowe. Następnie zachodzi proces żelowania zaczynu cementowego, tzn. budowanie statycznej wytrzymałości strukturalnej (ang. *static gel strength*, SGS) aż do całkowitego związania cementu. Proces żelowania ogranicza zdolność zaczynu cementowego do utrzymywania ciśnienia hydrostatycznego na nieco wyższym poziomie niż ciśnienie złożowe, co może prowadzić do migracji gazu do przestrzeni pierścieniowej. Przeprowadzone na świecie badania laboratoryjne wykazują, że wartość SGS wynosząca około 500 funtów/100 stóp², czyli około 250 Pa, może zablokować przepływ gazu przez wiążący zaczyn – jest to tzw. wartość graniczna SGS (Radecki i Witek, 2000; Scott et al., 2003).

Ciśnienie hydrostatyczne wywierane przez słup zaczynu cementowego obniża się wraz ze wzrostem SGS. Jak już wspomniano, gdy ciśnienie hydrostatyczne spadnie poniżej ciśnienia złożowego, zanim zaczyn osiągnie odpowiednią wartość SGS, to najprawdopodobniej gaz rozpocznie migrację przez niezwiązany do końca zaczyn cementowy, tworząc stałe kanały, które mogą być drogami jego niekontrolowanej migracji na powierzchnię (Dębińska, 2013; Velayati et al., 2015; Rzepka i Kędziński, 2019, 2020, 2021).

W procesie wiązania zaczynu wyróżnia się m.in. ważny parametr, jakim jest tzw. czas przejścia (ang. *transition time*, TT) (Crook i Heathman, 1998; Bybee, 2005). Czas przejścia TT literatura określa jako czas pomiędzy rozpoczęciem budowy statycznej wytrzymałości strukturalnej SGS a osiągnięciem

wartości granicznej statycznej wytrzymałości strukturalnej SGS, tj. od wartości SGS wynoszącej 50 Pa do wartości SGS wynoszącej 250 Pa (Rogers et al., 2004; Mohammadi i Moghadasi, 2007).

Działania polegające na opóźnieniu czasu początku budowy statycznej wytrzymałości strukturalnej umożliwiają wydłużenie okresu, w którym w otworze wiertniczym przenoszone jest ciśnienie hydrostatyczne na złożę. Zastosowanie z kolei zaczynów o krótkim czasie przejścia TT, nieprzekraczającym kilkudziesięciu minut, jest pomocne w planowaniu prac mających na celu ograniczenie migracji gazu z przestrzeni pierścieniowej, zwłaszcza w przypadku płytkich otworów wiertniczych.

Biorąc pod uwagę uszczelnianie złóż o niskim ciśnieniu, a także stref chłonnych, należy szczególnie skupić się na doborze odpowiedniej receptury zaczynu cementowego. Proces zapuszczania rur okładzinowych, jak i samo cementowanie otworów wiertniczych na złożach o niskim ciśnieniu mogą sprawiać szereg trudności serwisom cementacyjnym i wywoływać różnego rodzaju problemy. W związku z tym niezbędne jest opracowywanie odpowiednich receptur zaczynów cementowych dostosowanych do konkretnych warunków otworowych, co ma szczególne znaczenie przy uszczelnianiu za pomocą zaczynów o ciężarze poniżej 1500 kg/m³. Należy zaznaczyć, że przewiercanie warstw słabozwiązłych może stanowić jedną z częściej spotykanych przyczyn komplikacji wiertniczych. Ma to związek z możliwością wystąpienia sypliwości tych warstw wywołanej zaburzeniami tektonicznymi oraz oddziaływaniem płuczki wiertniczej.

Przy sypliwości skał występującej na znacznym odcinku otworu – zachodzi niebezpieczeństwo komplikacji wiertniczych spowodowanych powstaniem korków zagęszczonej płuczki i spadkiem prędkości wiercenia. Komplikacja ta może doprowadzić także do powstania awarii w postaci przychwycenia przewodu wiertniczego, składającego się z obciążników i rur płuczkowych, co przerwie dalsze wiercenie aż do likwidacji awarii. W przypadku obsypujących się skał może także dojść do rozwaru skał i wytworzenia kawerny o znacznie większej średnicy niż średnica wierconego otworu, co skutkuje zmniejszeniem prędkości przepływu płuczki w przestrzeni pierścieniowej oraz powolniejszym wynoszeniem zwiercin i spadkiem prędkości wiercenia. Ponadto kawerny magazynują płuczkę wiertniczą i zmniejszają efektywność uszczelniania rur okładzinowych zaczynem cementowym.

W celu zminimalizowania tych komplikacji należy w trakcie wiercenia stosować płuczki wiertnicze o odpowiednio dobieranych parametrach technologicznych. Natomiast uszczelniając kolumnę rur okładzinowych w tego rodzaju warunkach geologicznych, należy stosować zaczyn o zmniejszonej gęstości, tzw. zaczyn lekki.

Zaczyny lekkie znajdują zastosowanie głównie w przypadkach:

- konieczności wytłoczenia zaczynu cementowego w przeszczeniu pierścieniowej na znaczną wysokość;
- przewiercania profilu litologicznego, w którym mamy do czynienia z występowaniem warstw chłonnych;
- wiercenia w skałach słabo zwięzłych oraz poziomach produktywnych o niskim gradiencie ciśnienia złożowego.

Sporządzanie zaczynu lekkiego może się odbywać poprzez wprowadzenie do jego składu frakcji lekkich. Mogą to być różnego rodzaju wypełniacze. Najpopularniejszymi i najczęściej stosowanymi w przemyśle wypełniaczami są mikrosfery (rysunek 1). Mikrosfery to sferyczne drobiny o rozmiarach mikrometrycznych, składające się z różnego typu substancji. Najczęściej mikrosfery są dzielone na: ceramiczne (krzemowo-glinowe), polimerowe oraz szklane.



Rysunek 1. Mikrosfery ceramiczne użyte w badaniach laboratoryjnych

Figure 1. Ceramic microspheres used in laboratory tests

Mikrosfery ceramiczne (wykorzystane w badaniach laboratoryjnych w prezentowanym artykule) to materiały kuliste o niskiej gęstości nasypowej, które mają wewnątrz wypełnione gazem. Dodatek mikrosfery do zaczynu cementowego pozwala na obniżenie jego gęstości do około 1200 kg/m^3 .

Mikrosfery ceramiczne pod wpływem ciśnienia panującego w otworze mogą ulegać zgnieceniu, co należy uwzględnić podczas projektowania receptury zaczynu cementowego. Dlatego też używanie zaczynów cementowych z dodatkiem mikrosfer zalecane jest w otworach o niezbyt dużych głębokościach. Ponadto przy sporządzaniu receptur zawierających

mikrosfery należy uwzględnić dodatkową ilość wody zarobowej, niezbędnej do przygotowania odpowiednio płynnego zaczynu cementowego.

Badania laboratoryjne żelowania zaczynów cementowych o obniżonej gęstości

Badania laboratoryjne żelowania lekkich zaczynów cementowych przeznaczonych do uszczelniania warstw słabo zwięzłych bądź interwałów w strefach o niskim gradiencie ciśnienia złożowego były prowadzone w Zakładzie Technologii Wiercenia INiG – PIB. Pomiary wykonywano zgodnie z normami: PN-EN ISO 10426-2 *Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych. Część 2: Badania cementów wiertniczych* oraz PN-EN ISO 10426-6 *Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 6: Metody określania statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynów cementowych*.

Oznaczanie statycznej wytrzymałości strukturalnej wykonywano za pomocą urządzenia o nazwie Static Gel Strength Measurement (SGSM). W aparacie SGSM można zasymulować warunki otworowe, takie jak temperaturę i ciśnienie na dnie otworu. Do wyznaczania statycznej wytrzymałości strukturalnej używany jest mechanizm wolno rotujących łopatek, które są wprowadzane w ruch za pomocą napędu magnetycznego. Dzięki użyciu takiej metody pomiarowej zagwarantowany jest stały i ciągły monitoring procesu żelowania zaczynu cementowego. Po zakończeniu zbierania danych generowana jest w programie komputerowym krzywa narastania statycznej wytrzymałości strukturalnej i wyznaczane są wartości czasu TT (ang. *transition time*) oraz czasów, przy których zaczyn osiąga SGS wynoszącą 50 Pa i 250 Pa.

Ogólne receptury zaczynów cementowych wykorzystanych w badaniach laboratoryjnych zamieszczono w tabelach 1a oraz 1b. Lekkie zaczyny cementowe testowano w temperaturach 30°C i 40°C . Do wody zarobowej dodawano 0,5% bentonitu (wagowo w stosunku do masy wody zarobowej) i stosując zasolenie w ilości 3% KCl. Zaczyny były sporządzane na osnowie cementu portlandzkiego CEM I 42,5.

Receptury w tabeli 1a oznaczono symbolami K, A, B, C oraz D. Posiadały one w swym składzie dodatki: odpieniające, antyfiltracyjne, przyspieszające wiązanie, upłynniające oraz mikro cement i mikrosfery. Zaczyn o symbolu K (konwencjonalny) nie zawierał nanokomponentów. W składach A i B użyto nanotlenku krzemu ($n\text{-SiO}_2$), natomiast w składach C i D – nanotlenku glinu ($n\text{-Al}_2\text{O}_3$). Zastosowanie różnych ilości mikrosfer wraz z równoczesnym regulowaniem współczynnika w/c pozwoliło na uzyskanie zaczynów lekkich o ciężarach około $1460\text{--}1630 \text{ kg/m}^3$.

Zaczyny zamieszczone w tabeli 1b oznaczono symbolami E, F, G oraz H. W recepturach, podobnie jak w poprzednich zaczynach, używano dodatków odpinających, antyfiltracyjnych, upłynniających, a także mikrosfer. Ponadto do zaczynów o symbolach G oraz H testowanych w 40°C wprowadzono niewielką ilość opóźniacza wiązania (0,05% bwoc). Wszystkie składy zawierały polimer wielkocząsteczkowy o symbolu GS w ilości 7%. W zależności od współczynnika w/c oraz ilości użytych mikrosfer uzyskano gęstości zaczynów z przedziału od 1480 kg/m³ do 1600 kg/m³.

W przypadku wszystkich testowanych receptur wykonywano oznaczenia gęstości, a także pomiary narastania statycznej wytrzymałości strukturalnej (SGS), a co się z tym wiąże – czasu przejścia TT. Oprócz tego za pomocą aparatu Vicata prowadzono także badania początku i końca wiązania zaczynów cementowych (ASTM International, 2010).

W tabelach 2a i 2b zamieszczono wyniki badań przetestowanych zaczynów cementowych.

Zaczyn bazowy o symbolu K, o gęstości 1570 kg/m³ (zawierający 15% mikrosfer), uzyskał w temperaturze 30°C czas

Tabela 1a. Składy testowanych zaczynów cementowych

Table 1a. Compositions of tested cement slurries

Symbol zaczynu/ Składniki w % bwoc*	Zaczyn K konwencjonalny	Zaczyn			
		A	B	C	D
Temperatura badania	30°C	30°C	30°C	30°C	30°C
Woda wodociągowa	68	68	68	65	74
Bentonit	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
KCl**	3	3	3	3	3
Nanokomponenty (NS lub NA)***	–	NS 0,5	NS 0,5	NA 1,0	NA 1,0
Domieszka odpinająca	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Upłynnierz	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Przyspieszacz wiązania	1	1	2	1	2
Domieszka antyfiltracyjna	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Mikrosfery	15	15	15	10	25
Mikrocement	10	10	10	10	10
Cement portlandzki CEM I 42,5	100	100	100	100	100

* bwoc, tj. w stosunku do masy suchego cementu;
 ** KCl dodawany był w stosunku do masy wody zarobowej (bwow);
 *** zastosowano n-SiO₂ (NS – w składach A i B), n-Al₂O₃ (NA – w składach C i D)

Tabela 1b. Składy testowanych zaczynów cementowych

Table 1b. Compositions of tested cement slurries

Symbol zaczynu/ Składniki w % bwoc*	Zaczyn			
	E	F	G	H
Temperatura badania	30°C	30°C	40°C	40°C
Woda wodociągowa	52	56	54	56
Bentonit	0,5	0,5	0,5	0,5
KCl**	3	3	3	3
Polimer wielkocząsteczkowy (GS)***	7,0	7,0	7,0	7,0
Domieszka odpinająca	0,3	0,3	0,3	0,3
Upłynnierz	0,2	0,2	0,2	0,2
Opóźniacz wiązania	–	–	0,05	0,05
Domieszka antyfiltracyjna	0,1	0,1	0,1	0,1
Mikrosfery	10	20	15	20
Cement portlandzki CEM I 42,5	100	100	100	100

* bwoc, tj. w stosunku do masy suchego cementu;
 ** KCl dodawany był w stosunku do masy wody zarobowej (bwow);
 *** zastosowano polimer wielkocząsteczkowy GS

przejścia TT wynoszący 110 minut. Początek jego wiązania nastąpił po 4 h 5 min, a koniec wiązania po 5 h 10 min. Czas przejścia i czas początku wiązania zaczynu K były zatem zbyt długie, aby zapobiec wystąpieniu ewentualnej ekshalacji gazu. W tej samej temperaturze dla zmodyfikowanych zaczynów A i B o gęstości 1570 kg/m³ (na bazie nanokrzemionki), również zawierających 15% mikrosfer, uzyskano wyraźnie krótsze czasy przejścia (wynoszące odpowiednio 62 minuty oraz 32 minuty). Zaczyny A i B różniły się między sobą ilością zastosowanego środka przyspieszającego wiązanie. Zaczyn A uzyskał początek wiązania po 3 h 35 min i koniec wiązania po 4 h 20 min, natomiast dla zaczynu B początek wiązania zanotowano po 3 h, a koniec po 3 h 40 min. W przypadku zaczynów o symbolach C i D, zawierających nanotlenek glinu, zaobserwowano podobną sytuację.

Receptury te różniły się od siebie również ilością użytego środka przyspieszającego wiązanie, a także ilością mikrosfer (w zaczynie C mikrosfery stanowiły 10% bwoc, co spowodowało uzyskanie ciężaru zaczynu 1630 kg/m³, natomiast w zaczynie D ich ilość wyniosła 25% bwoc, co spowodowało zmniejszenie ciężaru zaczynu do 1460 kg/m³). W zaczynach C oraz D żelowanie następowało jeszcze szybciej niż w poprzednich recepturach (czas przejścia TT dla zaczynu C wynosił 43 minuty, a dla zaczynu D – jedynie 29 minut). Początek wiązania

dla zaczynu C nastąpił po 3 h 10 min, a koniec wiązania – po 3 h 50 min, natomiast w przypadku zaczynu D początek wiązania nastąpił po 2 h 55 min, a koniec wiązania – po 3 h 30 min.

Kolejne wyniki badań odnoszą się do receptur zaczynów z dodatkiem polimeru wielkocząsteczkowego o symbolu GS testowanych w temperaturach 30°C i 40°C. Zaczyny o symbolach E oraz F badano w temperaturze 30°C. W zależności od ilości użytych mikrosfer miały one gęstości: zaczyn E – 1600 kg/m³, zaczyn F – 1480 kg/m³. Ich czasy przejścia TT wynosiły: zaczyn E – 31 minut, zaczyn F – 35 minut. Zaczyn E uzyskał początek wiązania po 3 h 5 min, a koniec wiązania po 3 h 25 min. W przypadku zaczynu F początek wiązania zanotowano po 3 h 15 min, a koniec wiązania po 3 h 35 min. Zaczyny G oraz H testowane w 40°C, o gęstościach 1530 kg/m³ oraz 1480 kg/m³, również uzyskały krótkie czasy żelowania (TT dla zaczynu G wynosił 31 minut, natomiast dla zaczynu H – jedynie 23 minuty). Początek wiązania dla zaczynów G oraz H wynosił około 3½ godziny, a koniec wiązania nastąpił przed upływem 4 godzin.

Na rysunkach od 2 do 10 zamieszczono krzywe żelowania zaczynów cementowych. Kolorem zielonym oznaczono linie obrazujące przebieg narastania SGS. Wykresy przedstawiają również informacje na temat uzyskania przez zaczyny odpowiedniej wartości SGS oraz dane z uzyskanych czasów przejścia *transition time*.

Tabela 2a. Parametry zaczynów i kamieni cementowych testowanych w temperaturze 30°C

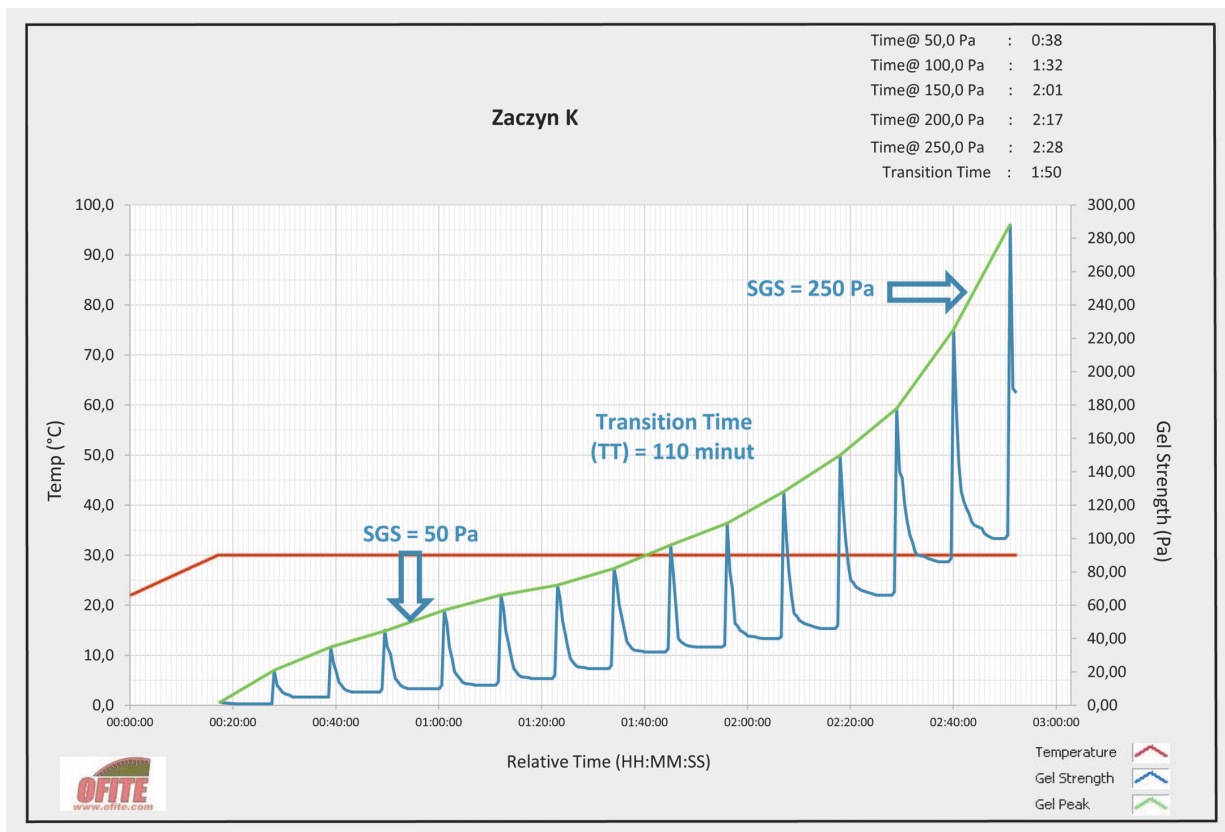
Table 2a. Parameters of cement slurries and stones tested at 30°C

Symbol zaczynu/ Oznaczany parametr	Zaczyn K konwencjonalny	Zaczyn			
		A	B	C	D
Temperatura badania	30°C	30°C	30°C	30°C	30°C
Gęstość zaczynu cementowego [kg/m ³]	1570	1570	1570	1630	1460
Czas, po którym zaczyn uzyskał SGS wynoszącą 50 Pa [minuty]	38	17	25	28	24
Czas, po którym zaczyn uzyskał SGS wynoszącą 250 Pa [minuty]	148	79	57	71	53
Czas przejścia (TT) [minuty]	110	62	32	43	29
Początek wiązania [h-min]	4-05	3-35	3-00	3-10	2-55
Koniec wiązania [h-min]	5-10	4-20	3-40	3-50	3-30

Tabela 2b. Parametry zaczynów i kamieni cementowych testowanych w temperaturach 30°C i 40°C

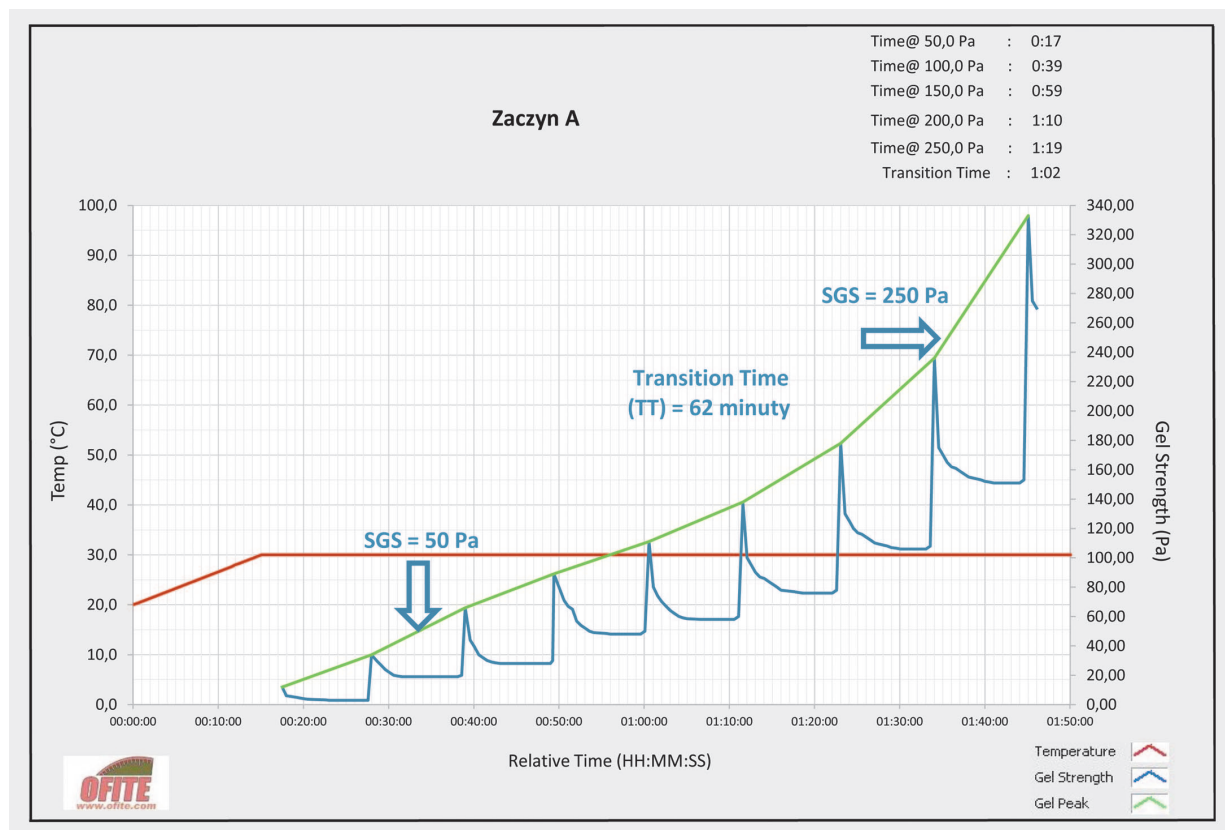
Table 2b. Parameters of cement slurries and stones tested at 30°C and 40°C

Symbol zaczynu/ Oznaczany parametr	Zaczyn			
	E	F	G	H
Temperatura badania	30°C	30°C	40°C	40°C
Gęstość zaczynu cementowego [kg/m ³]	1600	1480	1530	1480
Czas, po którym zaczyn uzyskał SGS wynoszącą 50 Pa [minuty]	11	12	12	7
Czas, po którym zaczyn uzyskał SGS wynoszącą 250 Pa [minuty]	42	47	43	30
Czas przejścia (TT) [minuty]	31	35	31	23
Początek wiązania [h-min]	3-05	3-15	3-30	3-25
Koniec wiązania [h-min]	3-25	3-35	3-55	3-50



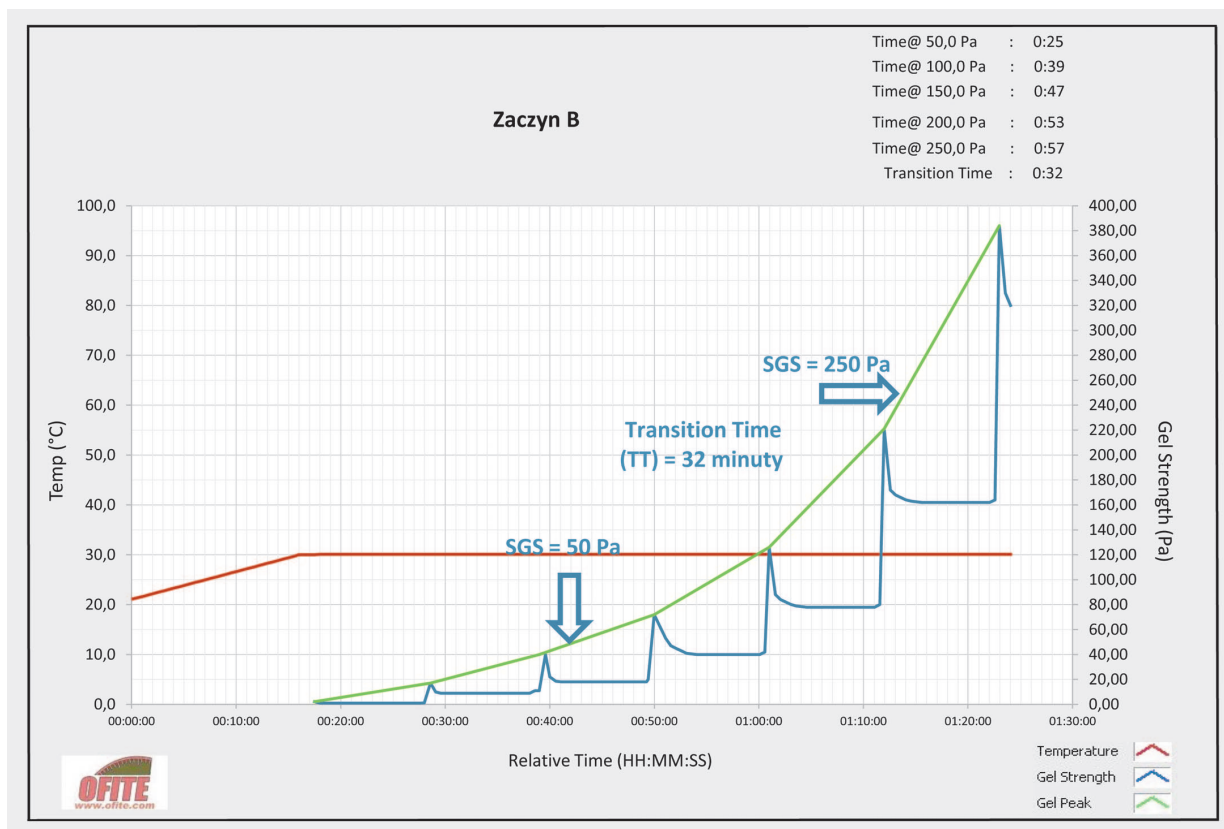
Rysunek 2. Narastanie statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynu cementowego o symbolu K

Figure 2. Static gel strength development for cement slurry K



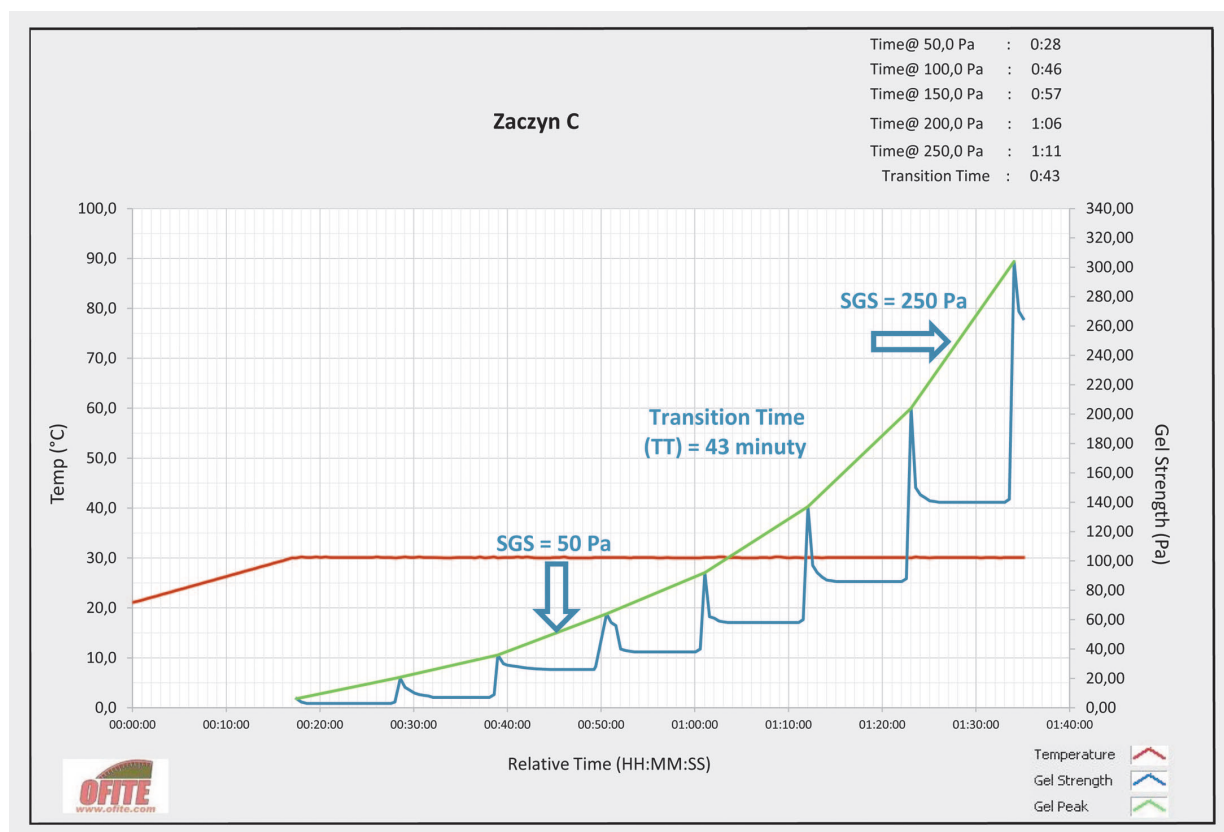
Rysunek 3. Narastanie statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynu cementowego o symbolu A

Figure 3. Static gel strength development for cement slurry A



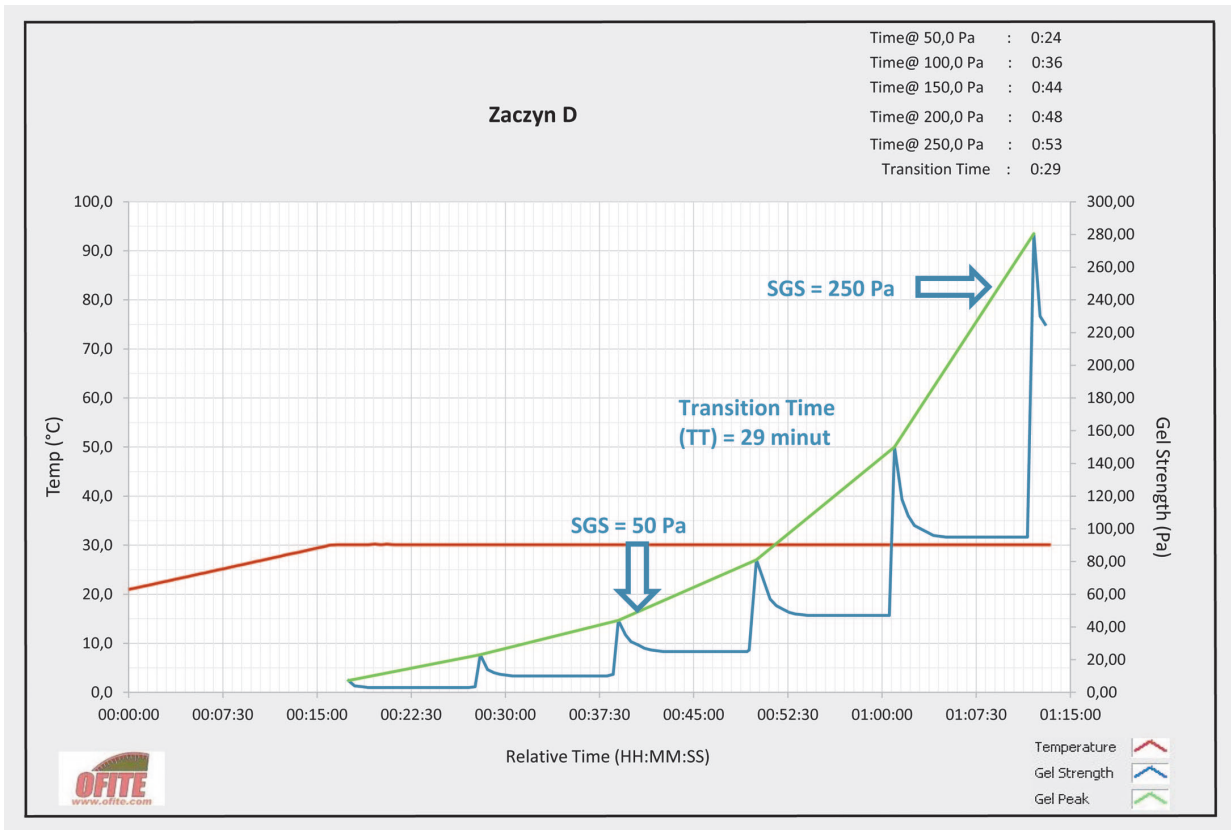
Rysunek 4. Narastanie statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynu cementowego o symbolu B

Figure 4. Static gel strength development for cement slurry B



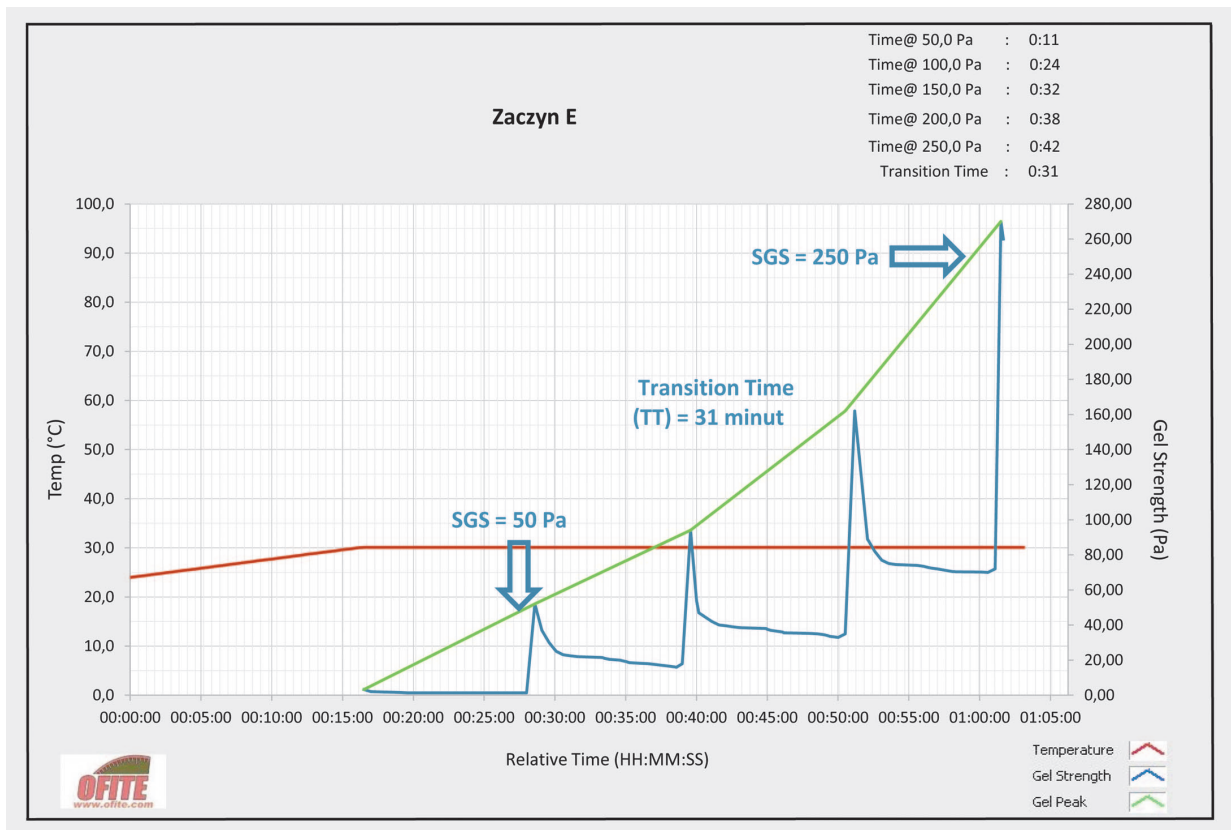
Rysunek 5. Narastanie statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynu cementowego o symbolu C

Figure 5. Static gel strength development for cement slurry C



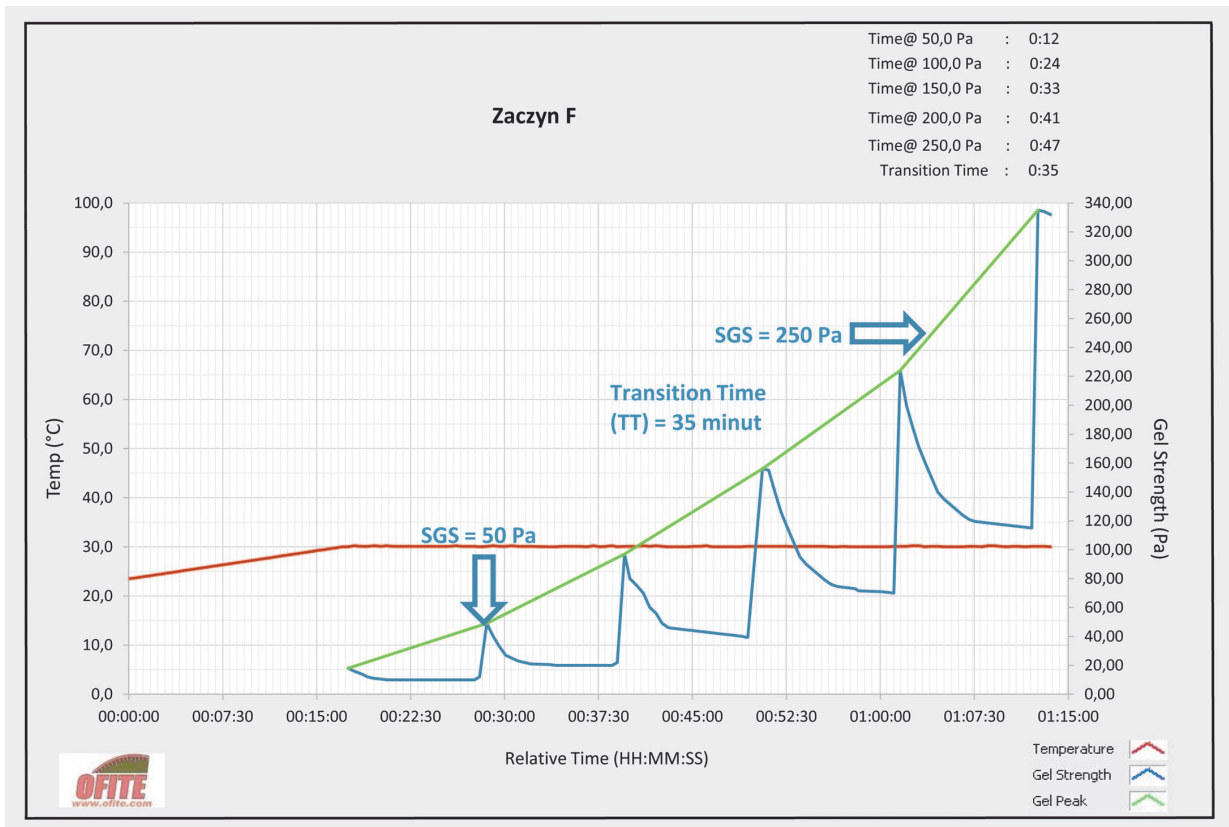
Rysunek 6. Narastanie statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynu cementowego o symbolu D

Figure 6. Static gel strength development for cement slurry D



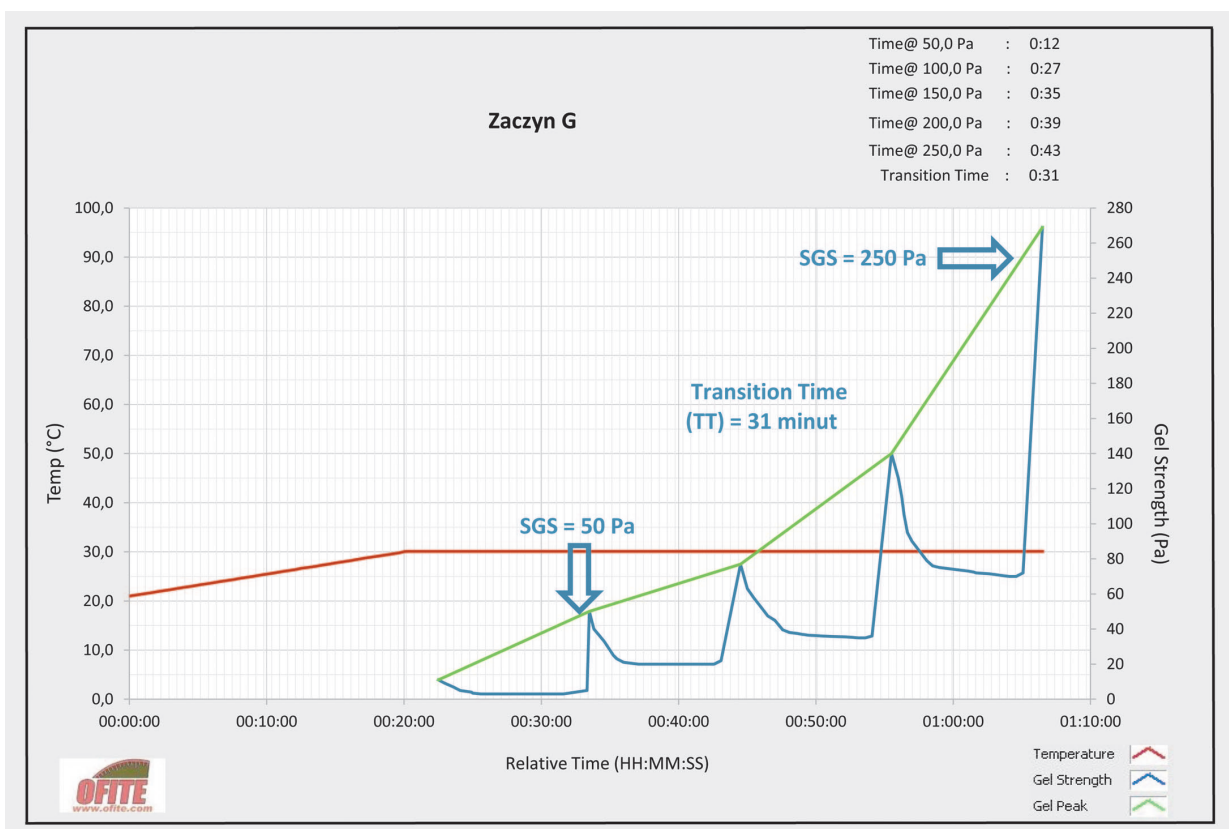
Rysunek 7. Narastanie statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynu cementowego o symbolu E

Figure 7. Static gel strength development for cement slurry E



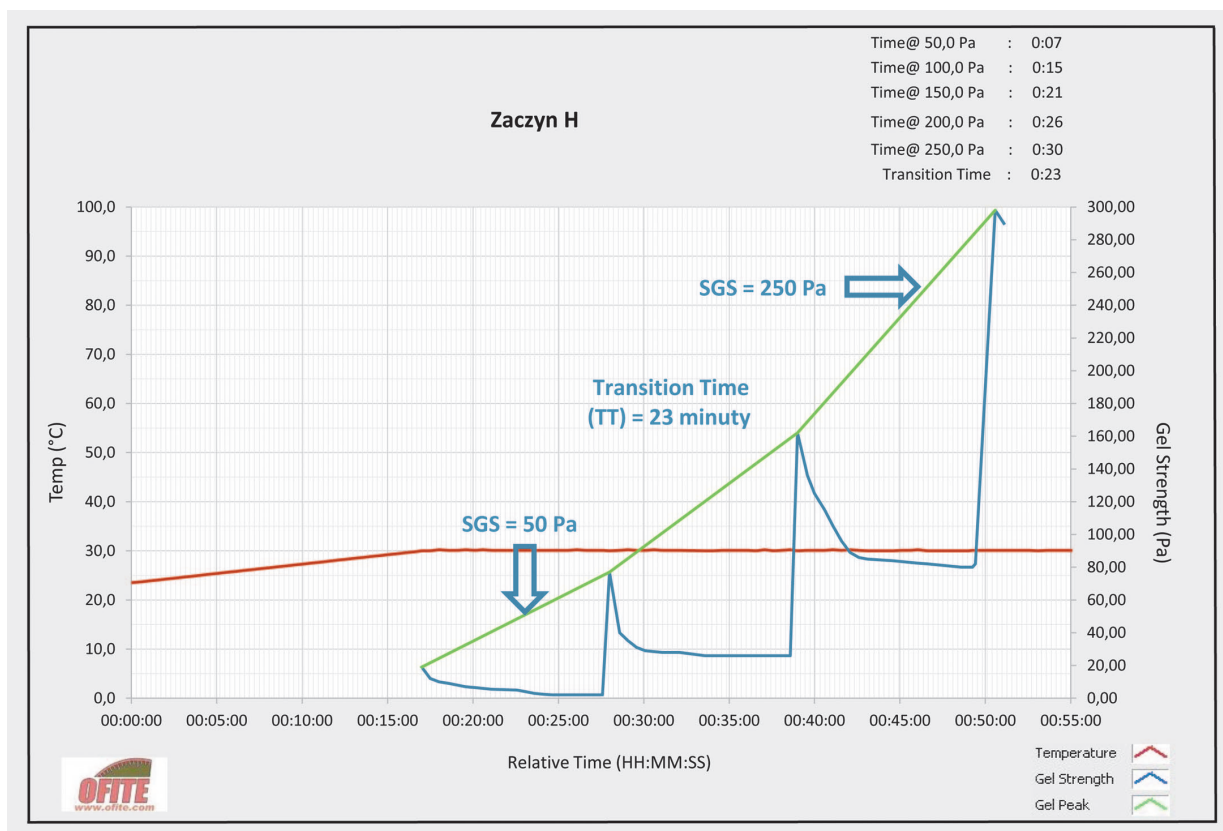
Rysunek 8. Narastanie statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynu cementowego o symbolu F

Figure 8. Static gel strength development for cement slurry F



Rysunek 9. Narastanie statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynu cementowego o symbolu G

Figure 9. Static gel strength development for cement slurry G



Rysunek 10. Narastanie statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynu cementowego o symbolu H
Figure 10. Static gel strength development for cement slurry H

Podsumowanie

W artykule zamieszczono wyniki badań żelowania szeregu receptur zaczynów cementowych o obniżonej gęstości opracowanych w INiG – PIB. Zaczyny cementowe testowano w temperaturach 30°C oraz 40°C, wprowadzając do nich różne dodatki i domieszki modyfikujące, w postaci m.in. nanomateriałów czy polimeru wielkocząsteczkowego. Badania opierały się głównie na wyznaczaniu tzw. czasu przejścia (ang. *transition time*), a także czasów początku i końca wiązania.

W celu przeciwdziałania migracji gazu w otworze wiertniczym z płytkich horyzontów gazowych konieczne jest m.in. stosowanie receptur cementowych o przyspieszonym czasie żelowania (wynoszącym około 30–40 minut), a także o odpowiednio dobranym czasie wiązania (w zależności do warunków panujących w otworze). Umożliwi to utworzenie się w wiążącej strukturze cementowej szczelnej bariery zapobiegającej przedostawaniu się gazu ziemnego przez płaszcz cementowy.

Lekkie zaczyny cementowe zmodyfikowane za pomocą nanokomponentów czy polimeru wielkocząsteczkowego, sporządzane na bazie cementu portlandzkiego CEM I 42,5, z powodzeniem nadają się do uszczelniania złóż o niskim ciśnieniu, a także stref chłonnych.

Zamieszczone w artykule receptury lekkich zaczynów cechują się odpowiednimi parametrami technologicznymi. Część z nich (o nieco dłuższym czasie przejścia TT oraz dłuższym czasie wiązania) będzie mogła zostać zastosowana do uszczelniania głębszych interwałów. Inne (o bardzo krótkich czasach TT) będzie można wykorzystać przy cementowaniu początkowego odcinka otworu wiertniczego (w przestrzeni pierścieniowej pomiędzy najpłycej zapuszczonymi rurami okładzinowymi).

Szczególnie korzystne parametry uzyskano w przypadku zaczynów cementowych zawierających nanotlenek glinu oraz polimer wielkocząsteczkowy GS. Próbkę z dodatkiem n-Al₂O₃ oraz polimeru GS posiadały wzorcowe krzywe żelowania (ich statyczna wytrzymałość strukturalna rosła od 50 Pa do 250 Pa w czasie około 30 minut).

Czasy wiązania opracowanych zaczynów cementowych można z powodzeniem regulować za pomocą powszechnie stosowanych w przemyśle domieszek przyspieszających lub opóźniających.

Receptury o najkorzystniejszych parametrach miały czasy początku wiązania wynoszące około 3–3½ godziny oraz czasy końca wiązania nieprzekraczające 4 godzin. Dlatego też w przypadku badanych receptur (w zależności od planowanego czasu trwania zabiegu cementowania rur okładzinowych)

możliwe jest odpowiednie dobranie czasu wiązania zaczynu cementowego w określonej temperaturze.

Artykuł powstał na podstawie projektów pt. *Multilateralny ma-łśrednicowy otwór odgazowujący pokłady węgla – MINE GAS SLIMHOLE DRILLING MIGASLIDRILL* – praca INiG – PIB; nr zlecenia: 6037/KW/2020, nr archiwalny: DK-0601/0005/2019 oraz *Zaczyny cementowe o krótkich czasach żelowania i wiązania do uszczelniania płytkich otworów wiertniczych na obszarze przedgórze Karpat – etap II* – nr zlecenia: 0592/KW/2020, nr archiwalny: DK-4100-0113/2020.

Literatura

- Bybee K., 2005. Transition Time of Cement Slurries. *J. Pet. Technol.*, 57(8): 45–70. DOI: 10.2118/0805-0045-JPT.
- Crook R., Heathman J., 1998. Predicting potential gas-flow rates to help determine the best cementing practices. *Drilling Contractor*, November–December: 40–43.
- Dębińska E., 2013. Wyznaczanie statycznej wytrzymałości strukturalnej i wczesnej wytrzymałości mechanicznej zaczynów cementowych. *Nafta-Gaz*, 69(2): 134–142.
- Kurdowski W., 2010. Chemia cementu i betonu. *Wydawnictwo Naukowe PWN/Polski Cement, Warszawa*.
- Kurdowski W., 2014. Cement and concrete chemistry. *Springer Science & Business, New York*.
- Mohammadi M., Moghadasi J., 2007. New cement formulation that solves gas migration problems in Iranian South Pars Field condition. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Manama, Bahrain*. DOI: 10.2118/105663-MS.
- Neville A.M., 2000. Właściwości betonu. *Wydawnictwo Polski Cement, Kraków*.
- Radecki S., Witek W., 2000. Dobór technik i technologii cementowania w aspekcie występowania migracji gazu. *Nafta-Gaz*, 76(9): 487–497.
- Ridi F., 2010. Hydration of Cement: Still a Lot to Be Understood. *Dipartimento di Chimica & CSGI Università di Firenze, La Chimica L'Industria*, 3: 110–117.
- Rogers M.J., Dillenbeck R.L., Eid R.N., 2004. Transition Time of Cement Slurries, Definitions and Misconceptions, Related to Annular Fluid Migration. *Society of Petroleum Engineers*. DOI: 10.2118/90829-MS.
- Rzepka M., Kędziński M., 2019. Zaczyny cementowe z dodatkiem nanokomponentów do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych o głębokości końcowej około 1000–2000 metrów. *Nafta-Gaz*, 75(11): 674–682. DOI: 10.18668/NG.2019.11.02.
- Rzepka M., Kędziński M., 2020. Możliwości zastosowania nanotlenku glinu w zaczynach cementowych przeznaczonych do uszczelniania rur okładzinowych w otworach wiertniczych. *Nafta-Gaz*, 76(1): 46–56. DOI: 10.18668/NG.2020.01.06.
- Rzepka M., Kędziński M., 2021. Badania procesu żelowania zaczynów cementowych przeznaczonych do uszczelniania otworów przewiercających płytkie poziomy gazonośne. *Nafta-Gaz*, 77(4): 235–243. DOI: 10.18668/NG.2021.04.03.
- Scott S.J., Adel A.A., Abdullah S.A., 2003. Gas migration after cementing greatly reduced. *Society of Petroleum Engineers*. DOI: 10.2118/81414-MS.
- Stryczek S., Gonet A., 2001. Wymagania odnośnie zaczynów uszczelniających stosowanych w technologiach wiertniczych. *Symposium Naukowo-Techniczne „Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynierskich oraz hydrotechnice”*, Pila-Płotki. Materiały konferencyjne: 31–41.
- Velayati A., Kazemzadeh E., Soltanian H., Tokhmechi B., 2015. Gas migration through cement slurries analysis: A comparative laboratory study. *Int. J. Min. & Geo-Eng.*, 49(2): 281–288. DOI: 10.22059/ijmge.2015.56113.

Akty prawne i dokumenty normatywne

- ASTM International, 2010. Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. <http://share.its.ac.id/pluginfile.php/19645/mod_folder/content/0/CON013_C191.pdf> (dostęp: 02.02.2018).
- PN-EN ISO 10426-2 Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 2: Badania cementów wiertniczych.
- PN-EN ISO 10426-6 Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 6: Metody określania statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynów cementowych.



Dr inż. Marcin RZEPKA
Kierownik Laboratorium Zaczynów Uszczelniających
w Zakładzie Technologii Wiercenia
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: marcin.rzepka@inig.pl



Mgr inż. Miłosz KĘDZIERSKI
Asystent w Zakładzie Technologii Wiercenia
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: miłosz.kedziński@inig.pl