

Edyta Dębińska

Institut Nafty i Gazu, Oddział Krosno

Wyznaczanie statycznej wytrzymałości strukturalnej i wczesnej wytrzymałości mechanicznej zaczynów cementowych

Wstęp

Zaczyn cementowy po zatłoczeniu do przestrzeni pierścieniowej stopniowo zaczyna wiązać, może to trwać od kilku godzin do kilku dni w zależności od warunków otworowych oraz składu zaczynu cementowego, aż do wykształcenia szczelnego płaszcz cementowego. Powstały płaszcz cementowy musi być na tyle wytrzymały, aby oprzeć się działającemu w otworze ciśnieniu złożowemu. Ponadto płaszcz cementowy musi być w stanie oprzeć się ciśnieniu hydrostatycznemu powstającemu w czasie wiercenia otworu, termicznemu obciążeniu spowodowanemu przez przyrost temperatury w otworze, a także okresowym obciążeniami powstałym na skutek hydratacji cementu, zabiegów stymulacyjnych, eksploatacji węglowodorów oraz zmianom ciśnienia i temperatury [7].

Po zatłoczeniu zaczynu do przestrzeni pierścieniowej zaczyna się proces hydratacji zaczynu cementowego. Tworzy się stan przejściowy między stanem płynnym a stałym – struktura żelowa; w tym czasie następuje również reduk-

cja ciśnienia hydrostatycznego. Brak równowagi ciśnień hydrostatycznych przyczynia się do migracji gazu lub cieczy w przestrzeni pierścieniowej, co stanowi duży problem w perspektywie dalszej eksploatacji odwiertu [5, 6].

Ważnym parametrem mogącym wpływać na ograniczenie migracji jest statyczna wytrzymałość strukturalna (SGS – *static gel strength*) zaczynu cementowego, a co się z tym łączy – czas przejścia (*transition time*). Im krótszy czas przejścia, tym mniejsze prawdopodobieństwo powstawania zjawiska migracji przez zaczyn cementowy. Od momentu rozpoczęcia tworzenia struktury żelowej ciśnienie hydrostatyczne wywierane przez zaczyn maleje, a co się z tym wiąże – wzrasta prawdopodobieństwo migracji gazu. Dla typowych zaczynów cementowych niezawierających dodatków opóźniających osiągnięcie wartości $SGS = 500$ funtów/100 stóp² (240 Pa) powinno nastąpić w czasie nie dłuższym niż 3 godziny, co ogranicza bądź nawet może zapobiec migracji gazu [14].

Styczna wytrzymałość strukturalna

Początkowo zaczyn cementowy po wtłoczeniu do przestrzeni pierścieniowej działa jak płyn i utrzymuje stałe ciśnienie hydrostatyczne działające na złożę, a tym samym równoważy ciśnienie złożowe. Następnie zachodzi proces żelowania zaczynu cementowego, tzn. budowanie statycznej wytrzymałości strukturalnej (SGS), aż do całkowitego związania cementu. Proces żelowania ogranicza zdolność zaczynu cementowego do utrzymywania ciśnienia hydrostatycznego wyższego niż ciśnienie złożowe, co może prowadzić do wejścia gazu do przestrzeni

pierścieniowej i zjawiska penetracji gazu przez zaczyn. Badania laboratoryjne wykazują, że wartość SGS około 500 lbs/100 ft², czyli 240 Pa, może zablokować przepływ gazu przez wiązający zaczyn, jest to tzw. wartość graniczna [3, 11]. Relację między SGS a ciśnieniem oporu przepływu wyraża wzór [3]:

$$P_{\max} = \frac{SGS}{300} \cdot \frac{L}{D}$$

gdzie:

P_{max} – maksymalne spodziewane ciśnienie przepływu,
 SGS – statyczna wytrzymałość strukturalna [funt/100 stóp²],
 300 – współczynnik przeliczeniowy dla P_{max} [psi],
 L – długość kolumny zaczynu cementowego [stopa],
 D – efektywna średnica kolumny zaczynu cementowego
 (średnica otworu minus średnica rur okładzinowych)
 [cal] [10].

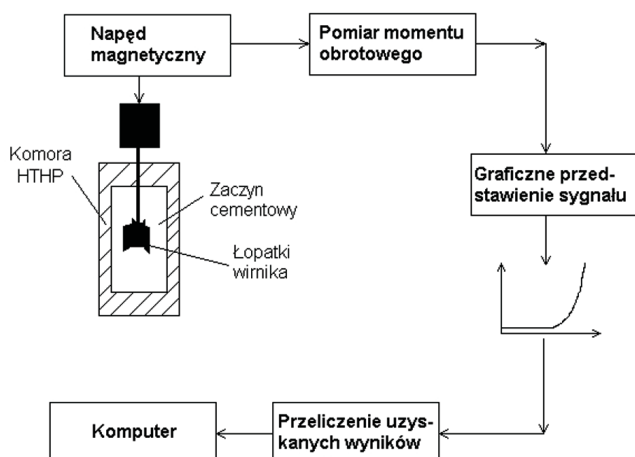
Znając maksymalne spodziewane ciśnienie przepływu, możemy określić wartość statycznej wytrzymałości strukturalnej, która może zablokować migrację.

Ciśnienie hydrostatyczne wywierane przez słup zaczynu cementowego obniża się wraz ze wzrostem SGS. Jeżeli ciśnienie hydrostatyczne spadnie poniżej ciśnienia złożowego, zanim zaczyn osiągnie odpowiednią wartość SGS, najprawdopodobniej nastąpi przepływ gazu przez zaczyn cementowy, tworząc stałe kanały [13].

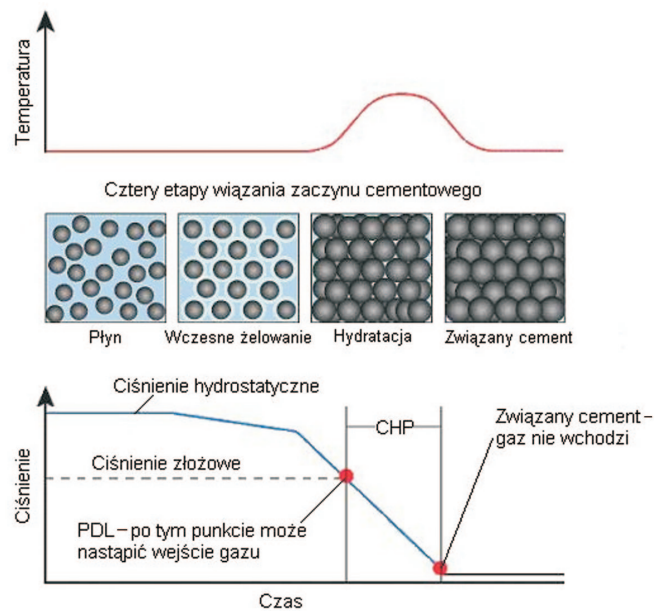
Czas przejścia (*transition time*) jest to czas między rozpoczęciem budowy SGS a osiągnięciem wartości granicznej SGS (od 48 do 240 Pa, czyli od 100 do 500 funtów/100 stóp²) [8]. Opóźnienie czasu początku budowy statycznej wytrzymałości strukturalnej pozwala na wydłużenie przenoszenia przez zaczyn ciśnienia hydrostatycznego wyższego niż ciśnienie złożowe [13]. Krótkie czasy przejścia, poniżej 30 minut, mogą pomóc w zapobieganiu migracji gazu oraz wejściu płynów złożowych i gazu do przestrzeni pierścieniowej [4].

Rysunek 1 przedstawia inwazję płynu do wiążącego zaczynu cementowego. Krótki CHP (krytyczny okres hydratacji) ogranicza migrację gazu lub płynu do zaczynu.

Do pomiaru statycznej wytrzymałości strukturalnej zastosowano ultradźwiękowy analizator cementu z modulem SGSM (*static gel strength measurement*). Jest to urzą-



Rys. 2. Schemat aparatu do pomiaru SGS



Rys. 1. Migracja płynu w wiążący zaczyn cementowy [1]

dzenie podobne budową do konsystometru, w którym pomiar następuje po okresie mieszania zaczynu potrzebnym do teoretycznego zatłoczenia do przestrzeni pierścieniowej. Urządzenie jest tak zaprojektowane, aby symulowało warunki otworowe, które można kontrolować w czasie badania. Po symulowanym zatłoczeniu zaczynu następuje wyłączenie mieszania, a pomiar statycznej wytrzymałości strukturalnej wykonywany jest przy użyciu rotujących stale i bardzo wolno ($0,5 \div 2,0$ stopni na minutę) łopatek, wprawianych w ruch przez napęd magnetyczny. Metoda ta zapewnia stały i ciągły pomiar momentu obrotowego, z którego następnie, znając geometrię łopatek, oblicza się statyczną wytrzymałość strukturalną [2]. Rysunek 2 przedstawia poglądowy schemat aparatu do pomiaru SGS. Na fotografii 1 pokazano aparat zastosowany w INiG.



Fot. 1. Ultradźwiękowy analizator cementu z modulem SGSM

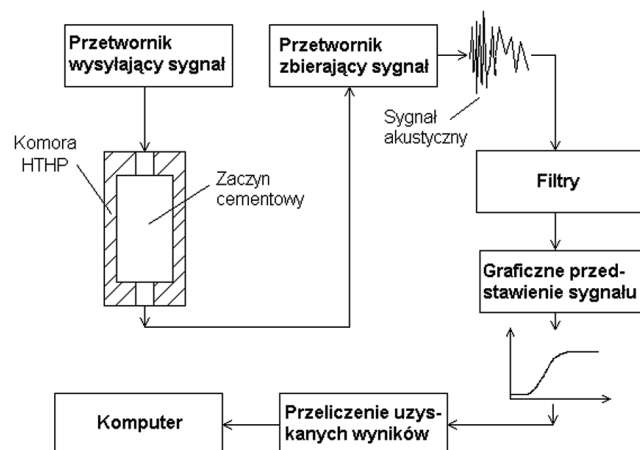
Wczesna wytrzymałość na ściskanie

W przemyśle naftowym określa się 2 typy wytrzymałości mechanicznej: wczesną wytrzymałość mechaniczną oraz długoterminową wytrzymałość mechaniczną. Wczesna wytrzymałość mechaniczna jest to wytrzymałość powstająca we wczesnej fazie wiązania cementu, po przygotowaniu i zatłoczeniu do otworu, natomiast długoterminowa to wytrzymałość powstała po zakończeniu procesu hydratacji cementu (28 dni do kilku lat) [7]. Uzyskanie zaczynu cementowego o odpowiedniej wczesnej wytrzymałości mechanicznej jest niezwykle istotne zarówno ze względów technologicznych, jak i ekonomicznych. Mówiąc o wczesnej wytrzymałości mechanicznej kamienia cementowego, mamy na myśli jego wytrzymałość na ściskanie. Parametr ten charakteryzuje wytrzymałość kamienia cementowego z reguły po 2 dniach hydratacji.

Jak podaje literatura [7], na jej wartość duży wpływ mają temperatura i ciśnienie. Wraz ze wzrostem temperatury i ciśnienia wzrasta wczesna wytrzymałość kamienia cementowego, tj. skraca się czas osiągnięcia jej maksymalnej wartości.

Pomiary wytrzymałości mechanicznej wykonywane są obecnie przy pomocy urządzenia znanego jako ultradźwiękowy analizator cementu (UCA – *ultrasonic cement analyzer*). Podstawą działania urządzenia jest korelacja między czasem przejścia fali ultradźwiękowej a wytrzymałością na ściskanie [13]. Aparat wykonuje pomiar wytrzymałości na ściskanie w czasie wiązania zaczynu cementowego w warunkach otworopodobnych. Komorę z zaczynem cementowym umieszcza się w wysokotemperaturowym i wysokociśnieniowym autoklawie. Płaszcz grzejny ma zdolność ogrzewania próbki w tempie do 5,6°C/min. Maksymalna temperatura badania wynosi 204°C, a maksymalne ciśnienie to 34,5 MPa. Na górze i dole komory umieszczone są przetworniki służące do pomiaru sygna-

łu akustycznego przechodzącego przez badaną próbkę. Mierzą one czas przejścia sygnału przez wiążący zaczyn cementowy. Krótki sygnał z dolnego przetwornika propaguje się przez badaną próbkę do górnego przetwornika. Wytrzymałość na ściskanie jest wyliczana przez program z czasu przejścia sygnału [2]. Schemat urządzenia przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Uproszczony schemat ultradźwiękowego analizatora cementu [2]

W przypadku wczesnej wytrzymałości na ściskanie ważne jest osiągnięcie przez kamień cementowy wartości 3,5 MPa (500 psi) [7, 14]. Świadczy to o jego związaniu w warunkach otworopodobnych i o możliwości rozpoczęcia dalszych prac w otworze wiertniczym.

Niepewność oszacowania statycznej wytrzymałości strukturalnej oraz wczesnej wytrzymałości mechanicznej ustalono na poziomie klasy dokładności aparatu UCA: na poziomie 0,1 Pa dla pomiaru statycznej wytrzymałości strukturalnej oraz 0,1 MPa dla pomiaru wczesnej wytrzymałości na ściskanie.

Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne wykonano zgodnie z obowiązującymi normami (PN-EN 10426-2 *Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów – Część 2: Badania cementów wiertniczych*, PN-85/G-02320 *Cementy i zaczyny cementowe do cementowania w otworach wiertniczych*, API SPEC 10 *Specification for materials and testing for well cements*).

W trakcie badań wykonano pomiary składów wykorzystywanych w przemyśle oraz w wybranych zmodyfikowanych recepturach (zawierających dodatek elastyczny).

Dla każdego składu wykonywano badanie wczesnej wytrzymałości na ściskanie przy zastosowaniu ultradźwiękowego analizatora cementu (metoda nieniszcząca), natomiast dla wybranych zaczynów wykonano również pomiar statycznej wytrzymałości strukturalnej. Badania te prowadzono do osiągnięcia wartości SGS podawanej w literaturze [9, 11, 15], tj. 500 funtów/100 stóp² (240 Pa).

W badanych zaczynach cementowych jako spoiwo wiążące zastosowano cement wiertniczy typu G lub cement portlandzki CEM I 32,5R. Zaczyny sporządzano na:

- wodzie zasolonej chlorkiem sodu w ilości 10% bwow (w stosunku do ilości wody),
- wodzie zasolonej chlorkiem potasu w ilości 3% bwow,
- wodzie niezasolonej.

W badaniach laboratoryjnych do wody zarobowej dodawano środek odpieniający i upłynniacz. W większości receptur stosowano lateks w ilości 10÷20% bwoc. Środki upłynniające, regulujące filtrację oraz czasy gęstnienia i wiązania dodawano w takiej kolejności, jak jest to zamieszczone w tablicach. Mikrosilikę, mikrocement oraz hematyt mieszano razem z cementem. Następnie mieszanie składników sypkich wprowadzano do wody zarobowej.

W artykule (tablice 1–4) zamieszczono wyniki badań przykładowych zaczynów cementowych dla temperatur: 25, 40, 60 i 90°C.

W tablicy 1 zamieszczono wyniki badań dla zaczynów stosowanych w temperaturze 25°C. Zaczyn 1 zawierał dodatek upłynniający, antyfiltracyjny, przyspieszacz wiązania oraz lateks. Wykonano go na cemencie 32,5 z dodatkiem mikrocementu. Charakteryzował się dosyć długim czasem do osiągnięcia wartości 3,5 MPa – prawie 15 godzin, natomiast posiadał krótki czas przejścia – 28 minut. Zaczyn nr 2 cechował się podobną recepturą jak poprzedni, z tym że

wykonano go na wodzie z 3-proc. KCl. Miał dużo dłuższy czas przejścia (1 godz. 55 min) oraz czas do osiągnięcia 3,5 MPa – 16 godz. 40 min. Obydwa zaczyny cementowe charakteryzowały się taką samą wytrzymałością. Po 24 godzinach wynosiła ona 5 MPa, a po 48 godzinach – 10 MPa.

Dla temperatury 40°C wykonano 3 zaczyny cementowe (tablica 2). Wszystkie składy wykonano na bazie cementu 32,5 i wody zasolonej 3-proc. KCl. Jeden z nich był badany również w temperaturze 25°C (skład nr 2). Wyższa temperatura w tym przypadku spowodowała poprawę parametrów mechanicznych. Zaczyn osiągnął znacznie szybciej, po niecałych 9 godzinach, wartość wytrzymałości równą 3,5 MPa. Po 24 godzinach wykazywał wytrzymałość 10 MPa (dwukrotnie wyższą niż w temperaturze 25°C), a po 48 godzinach – 14 MPa. Również czas przejścia uległ skróceniu do 42 minut. Zaczyny nr 3 i 4 charakteryzowały się zbliżonym składem, różniącym się jedynie ilością środka opóźniającego. Środek ten wpłynął nieznacznie na wydłużenie czasu osiągnięcia wartości 3,5 MPa dla zaczynu o większej jego ilości (zaczyn nr 3). Wartości wytrzymałości po 24 i 48 godzinach były zbliżone (skład nr 3: 24 godz. – 14 MPa, 48 godz. – 19 MPa; skład nr 4: 24 godz. – 16 MPa, 48 godz. – 21 MPa).

Tablica 1. Zaczyny cementowe stosowane w temperaturze 25°C

Skład zaczynu		Gęstość [g/cm ³]	Wczesna wytrzymałość na ściskanie [MPa]			Czas przejścia (transition time) [godz.:min]
			3,5 MPa [godz.:min]	24 godz. [MPa]	48 godz. [MPa]	
Skład 1		1,810	14:50	5	10	0:28
Woda	w/c = 0,52					
Środek przeciwpienny	1,0%					
Upłynniacz	0,2%					
Regulator filtracji	0,1%					
Stabilizator lateksu	2,0%					
Lateks	10,0%					
CaCl ₂	4,0%					
Mikrocement	20,0%					
Cement CEM I 32,5R	100,0%					
Dodatek spęczniający	0,3%					
Skład 2		1,795	16:40	5	10	1:55
Woda	w/c = 0,52					
KCl	3,0% bwow					
Środek przeciwpienny	1,0%					
Regulator filtracji	0,2%					
Upłynniacz	0,3%					
CaCl ₂	3,0%					
Stabilizator lateksu	2,0%					
Lateks	10,0%					
Mikrocement	20,0%					
Cement CEM I 32,5R	100,0%					
Dodatek spęczniający	0,3%					

Tablica 2. Zaczyny cementowe stosowane w temperaturze 40°C

Skład zaczynu		Gęstość [g/cm ³]	Wczesna wytrzymałość na ściskanie [MPa]			Czas przejścia (transition time) [godz.:min]
			3,5 MPa [godz.:min]	24 godz. [MPa]	48 godz. [MPa]	
Skład 2						
Woda	w/c = 0,52	1,795	8:50	10	14	0:42
KCl	3,0% bwow					
Środek przeciwpieenny	1,0%					
Regulator filtracji	0,2%					
Uplynniasz	0,3%					
CaCl ₂	3,0%					
Stabilizator lateksu	2,0%					
Lateks	10,0%					
Mikrocement	20,0%					
Cement CEM I 32,5R	100,0%					
Dodatek spęzniaszący	0,3%					
Skład 3						
Woda	w/c = 0,52	1,810	9:40	14	19	nb*
KCl	3,0% bwow					
Środek przeciwpieenny	1,0%					
Regulator filtracji	0,1%					
Uplynniasz	0,2%					
Dodatek opóźniaszący	0,15%					
Stabilizator lateksu	2,0%					
Lateks	10,0%					
Mikrocement	20,0%					
Cement CEM I 32,5R	100,0%					
Dodatek spęzniaszący	0,3%					
Skład 4						
Woda	w/c = 0,52	1,795	9:55	16	21	0:51
KCl	3,0% bwow					
Środek przeciwpieenny	1,0%					
Regulator filtracji	0,2%					
Uplynniasz	0,3%					
Dodatek opóźniaszący	0,1%					
Stabilizator lateksu	2,0%					
Lateks	10,0%					
Mikrocement	20,0%					
Cement CEM I 32,5R	100,0%					
Dodatek spęzniaszący	0,3%					

* nb – nie badano.

Taką samą liczbę badań – 3 – wykonano w temperaturze 60°C (tablica 3). Skład nr 5 wykonano na bazie cementu 32,5 z dodatkiem 10% mikrocementu i wody zasolonej 3-proc. KCl. Charakteryzował się on dosyć długim czasem przejścia – 3 godz. 2 min. Wartość wytrzymałości na ściskanie równą 14 MPa osiągnął po 24 godz., a 17 MPa po 48 godzinach. W składzie nr 6 zastosowano cement 32,5 z dodatkiem mikrocementu, a także 10% lateksu. Zaczyn osiągnął wartość 3,5 MPa już po 7 godz. 15 min. Posiadał także dosyć wysokie wartości wytrzymałości na ściskanie: po 24 godzinach – 15 MPa, a po 48 go-

dzinach – 18 MPa. Zaczyn cementowy nr 7 wykonano na bazie cementu wiertniczego G z dodatkiem 45% hematytu. W swoim składzie zawierał także 20% lateksu. Wpłynęło to na zwiększenie wartości wytrzymałości na ściskanie. Po 24 godzinach wynosiła ona 20 MPa, a po 48 godzinach – 24 MPa. Czas do osiągnięcia wartości 3,5 MPa wynosił 12 godz. 35 min. Zaczyn posiadał niezbyt długi czas przejścia, równy 1 godz. 40 min.

W tablicy 4 zamieszczono wyniki badań dla zaczynów stosowanych w temperaturze 90°C. Skład nr 8 zawierał dodatek przeciwpieenny, uplynniaszący, opóźniasz wiązania

Tablica 3. Zaczyny cementowe stosowane w temperaturze 60°C

Skład zaczynu		Gęstość [g/cm ³]	Wczesna wytrzymałość na ściskanie [MPa]			Czas przejścia (<i>transition time</i>) [godz.:min]
			3,5 MPa [godz.:min]	24 godz. [MPa]	48 godz. [MPa]	
Skład 5		1,820	9:30	14	17	3:02
Woda	w/c = 0,57					
KCl	3,0% bwow					
Środek przeciwienny	0,3%					
Uplynnac	0,4%					
Regulator filtracji	0,3%					
Dodatek opóźniający	0,25%					
Mikrocement	10,0%					
Cement CEM I 32,5R	100,0%					
Dodatek spęczniający	0,3%					
Skład 6		1,790	7:15	15	18	nb*
Woda	w/c = 0,52					
KCl	3,0% bwow					
Środek przeciwienny	1,0%					
Uplynnac	0,4%					
Regulator filtracji	0,2%					
Dodatek opóźniający	0,1%					
Stabilizator lateksu	2,0%					
Lateks	10,0%					
Mikrocement	20,0%					
Cement CEM I 32,5R	100,0%					
Dodatek spęczniający	0,3%					
Skład 7		2,200	12:35	20	25	1:40
Woda	w/c = 0,25					
KCl	3,0% bwow					
Środek przeciwienny	1,0%					
Uplynnac	0,4%					
Dodatek opóźniający	0,1%					
Stabilizator lateksu	2,0%					
Lateks	20,0%					
Hematyt	45,0%					
Cement G	100,0%					
Dodatek spęczniający	0,3%					

* nb – nie badano.

oraz lateks. Wykonano go na bazie cementu G z dodatkiem 30% hematytu, 10% mikrosiliki i wody zasolonej 10-proc. NaCl. Charakteryzował się dosyć krótkim czasem do osiągnięcia wartości 3,5 MPa, wynoszącym 7 godz. 25 min, posiadał także krótki czas przejścia – 59 min. Cechował się wysokimi wartościami wytrzymałości na ściskanie: po 24 godzinach – 20 MPa, a po 48 godzinach – 24 MPa. Zaczyn cementowy nr 9 posiadał podobną recepturę jak poprzedni – różnicą była większa zawartość hematytu (50%). Miał zbliżony czas przejścia (1 godz. 3 min) oraz taki sam czas do osiągnięcia 3,5 MPa – 7 godz. 25 min. Charakteryzował się nieco wyższą wytrzymałością na ściskanie. Po 24 godzinach wynosiła ona 22 MPa, a po

48 godzinach – 25 MPa. Receptura nr 10 została wykonana na bazie cementu G z dodatkiem mikrocementu i mikrosiliki oraz wody zasolonej 3-proc. KCl. Po 24 godzinach powstały kamień posiadał wytrzymałość równą 12 MPa, natomiast po 48 godzinach – 15 MPa. Zaczyn uzyskał krótki czas przejścia – 39 min, a także dosyć wcześnie osiągnął wymaganą wartość 3,5 MPa – po 8 godz. 4 min.

Na rysunku 4 widzimy przykładowy wykres rozwoju wczesnej wytrzymałości. Badanie wykonano dla zaczynu lateksowego nr 9 (z dodatkiem 50% hematytu). Przeprowadzono je w temperaturze 90°C i prowadzono przez 48 godzin. Po około 6 godzinach następuje początek wiązania, natomiast wytrzymałość 3,5 MPa zostaje osiągnięta

Tablica 4. Zaczyny cementowe stosowane w temperaturze 90°C

Skład zaczynu		Gęstość [g/cm ³]	Wczesna wytrzymałość na ściskanie [MPa]			Czas przejścia (transition time) [godz.:min]
			3,5 MPa [godz.:min]	24 godz. [MPa]	48 godz. [MPa]	
Skład 8		2,050	7:25	20	24	0:59
Woda	w/c = 0,34					
Środek przeciwiopienny	0,5%					
Uplynniciacz	0,15%					
Dodatek opóźniający	0,3%					
Stabilizator lateksu	0,5%					
Lateks	20,0%					
NaCl	10,0% bwow					
Mikrosilika	10,0%					
Hematyt	30,0%					
Cement G	100,0%					
Skład 9		2,160	7:25	22	25	1:03
Woda	w/c = 0,34					
Środek przeciwiopienny	0,5%					
Uplynniciacz	0,1%					
Dodatek opóźniający	0,37%					
Stabilizator lateksu	0,6%					
Lateks	20,0%					
NaCl	10,0% bwow					
Mikrosilika	10,0%					
Hematyt	50,0%					
Cement G	100,0%					
Skład 10		1,800	8:04	12	15	0:39
Woda	w/c = 0,54					
KCl	3,0% bwow					
Środek przeciwiopienny	1,0%					
Regulator filtracji	0,2%					
Uplynniciacz	0,3%					
Dodatek opóźniający	0,2%					
Stabilizator lateksu	2,0%					
Lateks	10,0%					
Dodatek elastyczny	10,0%					
Mikrosilika	10,0%					
Mikrocement	20,0%					
Cement G	100,0%					
Dodatek spęczniający	0,2%					

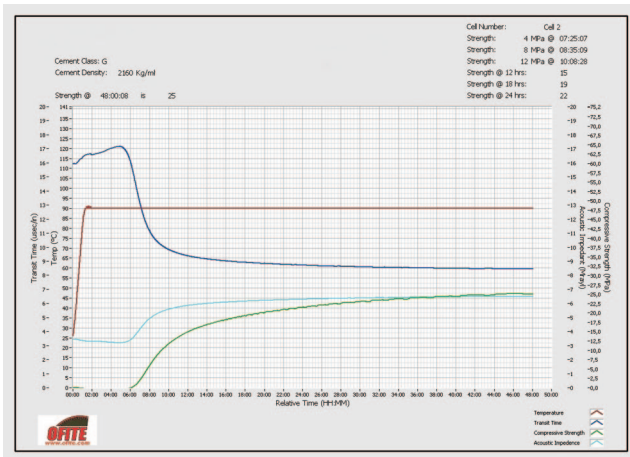
już po 7 godz. 25 min. W początkowej fazie, tj. w pierwszych 24 godzinach, następuje najbardziej intensywny wzrost wytrzymałości na ściskanie – do wartości 22 MPa, który ulega spowolnieniu w dalszym okresie i po 48 godzinach wytrzymałość wynosi 25 MPa.

Dla porównania na rysunku 5 zamieszczono wykres narastania wczesnej wytrzymałości mechanicznej dla zaczynu nr 2, który cechował się najdłuższym czasem do osiągnięcia wartości 3,5 MPa (16 godz. 40 min w temperaturze 25°C). Jak można zauważyć, krzywa charakteryzująca wytrzymałość na ściskanie ma bardzo łagodny przebieg,

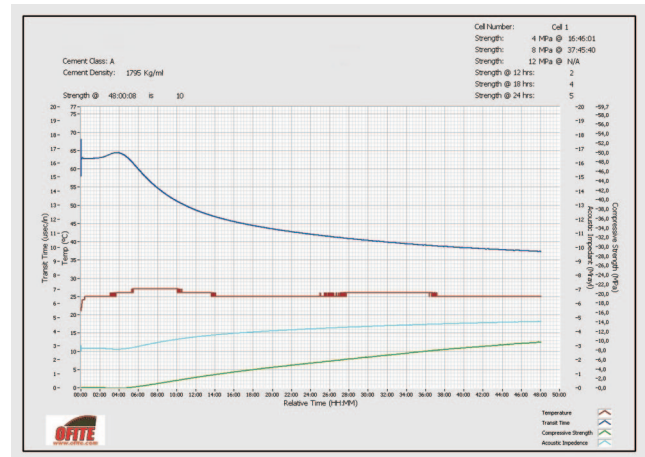
wytrzymałość narasta bardzo powoli i nie osiąga tak wysokich wartości jak w przypadku zaczynu nr 9.

Rysunek 6 przedstawia wykres statycznej wytrzymałości strukturalnej dla zaczynu nr 1. Po zakończeniu mieszania zaczyn zaczyna rozwijać wytrzymałość strukturalną. Czas przejścia (do osiągnięcia wartości 500 funtów/100 stóp² = 240 Pa) w przypadku tego zaczynu wynosi 28 minut. Jest to czas niezwykle krótki i można domniemywać, że mało prawdopodobna jest migracja gazu lub płynu przez ten zaczyn.

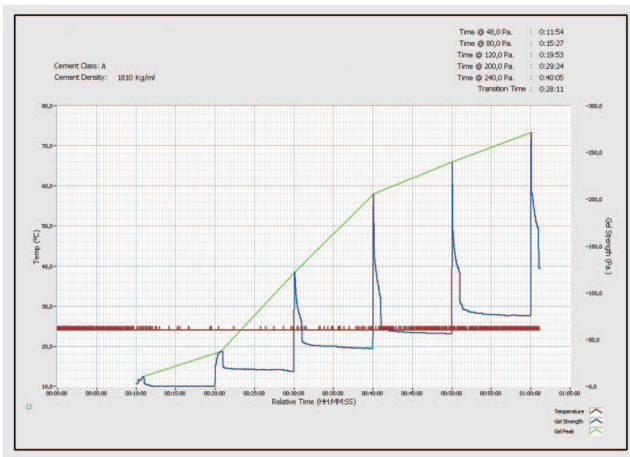
Z rysunku 7 widzimy, że w przypadku tego zaczynu



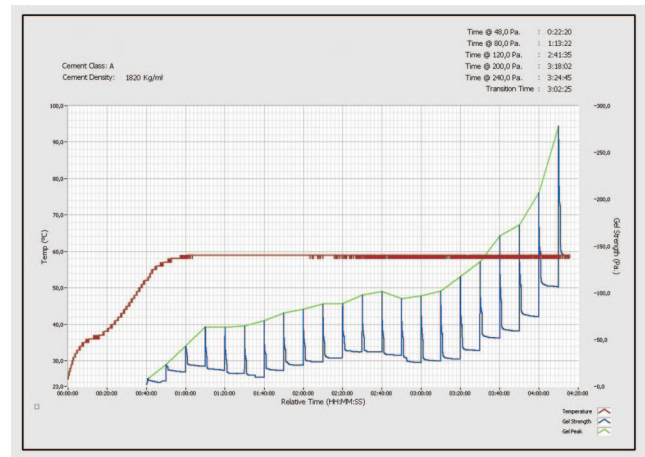
Rys. 4. Wykres narastania wczesnej wytrzymałości mechanicznej dla składu nr 9



Rys. 5. Wykres narastania wczesnej wytrzymałości mechanicznej dla składu nr 2



Rys. 6. Wykres narastania statycznej wytrzymałości żeluz dla składu nr 1



Rys. 7. Wykres narastania statycznej wytrzymałości żeluz dla składu nr 5

(nr 5) czas narastania statycznej wytrzymałości strukturalnej jest długi (wzrost wartości od 48 Pa do 240 Pa zajmuje ponad 3 godziny). Po osiągnięciu wymaganej temperatury i zaprzestaniu mieszania zaczyn bardzo szybko osiąga

48 Pa, czyli wartość określaną jako początek tworzenia struktury żelowej, a potem przez dłuższy czas rozwija statyczną wytrzymałość strukturalną, aż do osiągnięcia wartości granicznej 240 Pa.

Podsumowanie

Opracowanie zaczynów cementowych cechujących się odpowiednio dobranymi parametrami mechanicznymi, tj. szybkim rozwojem struktury żelowej (krótki *transition time*), a następnie szybko narastającą wczesną wytrzymałością na ściskanie, jest bardzo ważne przy projektowaniu zabiegu cementowania dla otworów wiertniczych. Podczas użycia takich receptur w otworze zapewniona zostaje odpowiednia izolacja przestrzeni pierścieniowej.

Wykonano badania rozwoju struktury żelowej oraz wczesnej wytrzymałości na ściskanie dla zaczynów cementowych stosowanych w wiertnictwie metodą nieniszczącą przy użyciu ultradźwiękowego analizatora cementu. Bada-

nia przeprowadzono dla 4 zakresów temperatur. Otrzymane wyniki pozwoliły na uzyskanie szeregu informacji na temat procesów zachodzących podczas wczesnego okresu twardnienia różnych typów zaczynów cementowych badanych w warunkach HTHP. W większości przypadków wartość 3,5 MPa – pozwalającą na dalsze prace w otworze wiertniczym – zaczyny osiągały między 7 a 12 godziną od rozpoczęcia badania. Najdłuższymi czasami charakteryzowały się zaczyny nr 1 i nr 2 (około 15÷17 godzin), najkrótszymi: 6, 8, 9 (około 7 godzin). Można zauważyć, że przy wyższych temperaturach czas do osiągnięcia wartości 3,5 MPa był znacznie krótszy niż w niskiej temperaturze.

Największy wzrost wczesnej wytrzymałości następował w pierwszych 24 godzinach. W tym czasie można zaobserwować najintensywniejszy jej rozwój (zaczyny posiadały wytrzymałość w granicach od 5 MPa do 20 MPa). W kolejnych okresach szybkość wzrostu obniżała się. Najwyższe wartości wytrzymałości uzyskano dla zaczynów z dodatkiem hematytu i mikrosiliki – składy 4, 7, 8, 9 (po 48 godzinach wynosiły one powyżej 20 MPa).

Równie ważne jest, aby zaczyny typowane do zastosowania przemysłowego posiadały krótki czas przejścia z fazy płynnej do żelowej, gdyż ogranicza to zjawisko

migracji przez zaczyn cementowy. Dla wybranych zaczynów przeprowadzono pomiar statycznej wytrzymałości strukturalnej. Jak można zauważyć z przeprowadzonych badań, wartość ta dla większości receptur oscylowała w granicach 1 godziny (sprzyja to zabezpieczeniu przed migracją płynu złożowego przez twardniejący zaczyn). Najdłuższy czas przejścia (ponad 3 godziny) posiadał zaczyn nr 5.

Tempo narastania statycznej wytrzymałości żelu można regulować dodatkiem przyspieszającym bądź opóźniającym czas wiązania.

Literatura

- [1] *Cement Additives*. www.sereneenergy.org/Cement-Additives.php, dostęp: 16.10.2012 r.
- [2] *Cement – właściwości i zastosowanie*. Grupa Górażdże, www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/B73800BE-2D4A-4F6A-878F-D6E7933D2B78/0/Ksi%C4%85%C5%BCeczkaGG2011Rozdzial05.pdf, dostęp: 24.09.2012 r.
- [3] Crook R., Heathman J.: *Predicting potential gas-flow rates to help determine the best cementing practices*. „Drilling Contractor” 1998, November/December, s. 40–43.
- [4] *DeepCRETE System*. The Schlumberger, www.slb.com/~media/Files/cementing/product_sheets/deepcrete.pdf, dostęp: 15.08.2012 r.
- [5] Herman Z.: *Problemy migracji i ekshalacji gazu w odwiertach*. www.inig.pl/hercules/reports/thirdyear/files/3WP2-3.3.pdf, dostęp: 16.08.2012 r.
- [6] Kremieniewski M.: *Proces migracji gazu w trakcie wiązania zaczynu cementowego*. „Nafta-Gaz” 2011, nr 3, s. 175–181.
- [7] Labibzadeh M., Zahabizadeh B., Khajehdezfuly A.: *Early-age compressive strength assessment of oil well class G cement due to borehole pressure and temperature changes*. „Journal of American Science” 2010, vol. 6, issue 7, s. 38–45.
- [8] Mammadbayli R., Greener J.: *Foamed cement successfully applied in shallow water environment in Caspian Sea*. „Drilling Contractor” 2006, September/October, s. 64–69.
- [9] Murray S. J.: *Determination of strength and stiffness of calcium silicate hydrate using molecular dynamics*. www.grin.com/en/doc/241967/determination-of-strength-and-stiffness-of-calcium-silicate-hydrate-using; dostęp: 2009 r.
- [10] Nelson E. B. i in.: *Well Cementing*. Schlumberger Educational Service, Houston, Teksas, USA, 1990.
- [11] Oskarsen R. T., Wright J. W., Walzel D.: *Analysis of gas flow yields recommendations for best cementing practices*. „World Oil” 2010, vol. 231, no. 1, s. 33–39.
- [12] Radecki S., Witek W.: *Zapobieganie migracji gazu. Dobór technik i technologii cementowania*. „Nafta-Gaz” 1999, nr 4.
- [13] Rogers M. J., Dillenbeck R. L., Eid R. N.: *Transition Time of Cement Slurries, Definitions and Misconceptions, Related to Annular Fluid Migration*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 26–29 September 2004.
- [14] Sabins F. L. i in.: *Acoustic method for determining the static gel strength of a cement slurry*. United States, Patent, nr 5992223, data wydania: 30.11.1999 r.
- [15] Wojtanowicz A. K., Manowski W., Nishikawa S.: *Final Report: Gas flow in wells after cementing*. Louisiana, Louisiana State University, 2000.



Mgr Edyta DĘBIŃSKA – absolwentka Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie. Pracownik Zakładu Technologii Wiercenia Instytutu Nafty i Gazu, Oddział Krosno. Zajmuje się badaniami zaczynów cementowych stosowanych do uszczelniania rur okładzinowych w otworach wiertniczych.