

## Zaczyny o obniżonej gęstości stosowane w warunkach występowania komplikacji w otworze wiertniczym

### Light weight cement slurries used in condition of complications in the wellbore

Marcin Kremieniewski

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** Podczas realizacji otworu wiertniczego mogą się pojawić różnego rodzaju problemy, których efektem są komplikacje wiertnicze. Jednym z takich problematycznych aspektów jest wiercenie w strefach anomalnie wysokiego i anomalnie niskiego ciśnienia złożowego. W przypadku występowania takich stref zachodzi ryzyko wtargnięcia medium złożowego w strukturę cieczy wiertniczej lub ucieczki cieczy wiertniczej w strefę warstw chłonnych. Zjawiska takie mogą zachodzić na skutek zaburzenia równowagi ciśnień w otworze. W celu wyeliminowania tych niebezpiecznych sytuacji stosuje się płuczki i zaczyny cementowe o odpowiednio dobranej gęstości i odpowiednich parametrach reologicznych. W celu uszczelnienia kolumn rur posadowionych w strefie anomalnie niskiego ciśnienia złożowego należy stosować receptury zaczynów o obniżonej gęstości. Zaczyny takie otrzymuje się poprzez wprowadzenie do ich objętości lekkich wypełniaczy. Jednak podczas projektowania takiej receptury zaczynu lekkiego często pojawiają się problemy z uzyskaniem odpowiedniej stabilności sedymentacyjnej. Frakcjonowanie lekkich cząsteczek w zaczynie powoduje występowanie anizotropii w strukturze zarówno płynnego, jak i związanego zaczynu. Przejawia się to znacznymi różnicami w uzyskanych wartościach parametrów (m.in. gęstości, przepuszczalności dla gazu, wytrzymałości na ściskanie, porowatości) w zależności od miejsca pobrania próbki. W celu wyeliminowania tego zjawiska badaniom na etapie projektowania danej receptury poddawane są zarówno dodatki i domieszki, jak też same zaczyny sporządzone przy użyciu tych środków. Zaprojektowanie zaczynu cementowego odpowiedniego do danych warunków geologiczno-technicznych pozwala zapobiec wystąpieniu lub wyeliminować wystąpienie w otworze wiertniczym komplikacji, mogących powstać na przykład na skutek rozwarstwienia zaczynu i uzyskania niejednorodnej gęstości na całej długości uszczelnianego interwału. W niniejszym artykule przedstawione zostały wyniki badań dla 5 receptur zaczynów lekkich. Receptura bazowa to zaczyn zawierający 15% mikrosfery glinokrzemianowej, którego matryca cementowa jest doszczelniona dodatkiem mikrocementu. Natomiast pozostałe receptury to zaczyny, które zawierają 40% mikrosfer glinokrzemianowych. W recepturach przeznaczonych do uszczelniania otworów w rejonie możliwości pojawienia się komplikacji wiertniczych zastosowano dodatkowo aktywator wiązania, który spowodował wzrost parametrów reologicznych. Pozwoliło to wyeliminować frakcjonowanie lekkiego dodatku wypełniającego. Działanie takie było niezbędne ze względu na konieczność zainicjowania i przyspieszenia procesu hydratacji w niskiej temperaturze (30°C), ale również wyeliminowania anizotropii mikrostruktury płaszczu cementowego, który mógł się wytworzyć z niejednorodnego zaczynu cementowego. W celu doszczelnienia matrycy płaszczu cementowego zastosowano dodatek lateksu, a ponadto zaprojektowane zostały zaczyny bez domieszki lateksu. Opracowane receptury zaczynów mogą być stosowane w warunkach temperatury od 30°C do ponad 50°C w rejonie wystąpienia ewentualnych komplikacji wiertniczych związanych z anomalnie niskimi ciśnieniami złożowymi.

**Słowa kluczowe:** lekki zaczyn cementowy, frakcjonowanie, wypełniacze lekkie, stabilność sedymentacyjna, anomalnie niskie ciśnienie złożowe.

**ABSTRACT:** Problems of various kinds may arise during the execution of the borehole, resulting in drilling complications. One such problematic aspect is drilling in anomalously high and anomalously low reservoir pressure zones. In the presence of such zones, there is a risk of the formation medium intrusion into the structure of the drilling fluid or the drilling fluid escaping into the thief zone. Such a phenomenon may occur as a result of an imbalance of pressures in the borehole. In order to eliminate this phenomenon, cement scrubbers and slurries with appropriately selected density and rheological parameters are used. In order to seal columns of pipes located in the zone of anomalously low formation pressure, the formulas for reduced density slurries should be used. Such starters are obtained by introducing light fillers into their volume. However, when designing such a light cement slurry formula, problems often arise in obtaining adequate sedimentation stability. The fractionation of light molecules in the cement slurry causes anisotropy in the structure of both the liquid and the bound cement slurry. It is manifested by significant differences in the obtained parameter values (e.g. density, gas permeability, compressive strength, porosity) depending on the place of sample collection. In order to eliminate this phenomenon, both additives and admixtures, as well as the slurries prepared using these agents, are tested at the stage of designing a given formula. Designing a cement slurry suitable for the given geological and technical conditions allows to prevent or eliminate the occurrence of

Autor do korespondencji: M. Kremieniewski, e-mail: [marcin.kremieniewski@inig.pl](mailto:marcin.kremieniewski@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji: 01.10.2021 r. Zatwierdzono do druku: 26.10.2021 r.

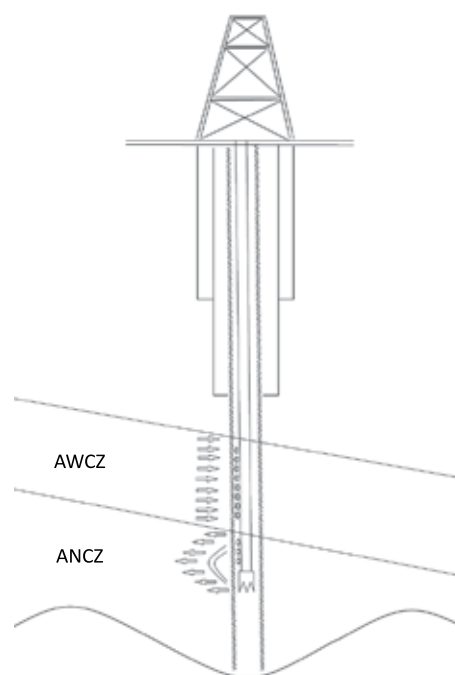
complications in the borehole, which may arise, for example, as a result of slicing of the slurry, and to obtain a non-uniform density along the entire length of the sealed interval. This article presents the research results for 5 light weight cement slurries. The base formula is a cement slurry containing 15% aluminosilicate microspheres, the cement matrix of which is sealed with the addition of microcement. The other formulas, on the other hand, are slurries that contain 40% of aluminosilicate microspheres. In the formulas intended for sealing boreholes in the area of possible drilling complications, a binding activator was additionally used, which caused an increase in rheological parameters. This allowed the elimination of fractionation of the light filler additive. Such action was necessary due to the need to initiate and accelerate the hydration process at a low temperature of 30°C, but also to eliminate the anisotropy of the microstructure of the cement sheath, which could be produced from the inhomogeneous cement slurry. In order to seal the matrix of the cement mantle, the addition of latex was used, but additionally slurries without the admixture of latex were designed. The developed slurry formulas can be used in temperature conditions from 30°C to over 50°C in the area of possible drilling complications related to anomalously low formation pressures.

Key words: light weight cement slurry, fractionation, light fillers, sedimentation stability, anomalously low reservoir pressure.

## Wprowadzenie

Zachowanie się zaczynu cementowego w rejonach występowania anomalnych ciśnień złożowych przysparza niekiedy różnego rodzaju problemów związanych z koniecznością zapobiegania komplikacjom wiertniczym. Komplikacje takie mogą być spowodowane anomalnie wysokimi wartościami ciśnień złożowych (AWCZ) oraz anomalnie niskimi wartościami tych ciśnień (ANCZ). W przypadku pojawiania się wysokich ciśnień złożowych płyny docierają do otworu wskutek dużej różnicy pomiędzy nadmiernym ciśnieniem panującym w złożu, a niższym ciśnieniem hydrostatycznym słupa cieczy wiertniczej (płuczki, buforu, zaczynu) w otworze (Nelson, 1990; Chung et al., 2018; Kremieniewski, 2020c). Taki stan powoduje naruszenie równowagi ciśnień w otworze, natomiast podczas wystąpienia wysokiej mineralizacji płynów złożowych może również zachodzić skażenie płuczki wiertniczej, objawiające się utratą przez nią właściwości reologicznych, chemicznych czy gęstości (Kremieniewski, 2020e). Konsekwencją tego może być naruszenie stanu równowagi ciśnień złożowych i równowagi chemicznej, a niekiedy nawet erupcja płynu złożowego (Daou i Piot, 2009; Kremieniewski, 2020a). Z kolei podczas przewiercania stref anomalnie niskiego ciśnienia złożowego może zachodzić wnikanie płuczki w przewiercany profil, w wyniku czego obniżeniu ulega ciśnienie hydrostatyczne słupa płuczki, co powoduje naruszenie stanu równowagi ciśnień. Takie obniżenie wartości przeciwcisnienia płuczki wobec ściany otworu, lub w krytycznym przypadku całkowity brak przeciwcisnienia, może spowodować obsypywanie ściany otworu i w konsekwencji doprowadzić do wystąpienia dalszych komplikacji (Peng i Jacobsen, 2013; Kremieniewski, 2020b). Znacznie trudniejszą sytuacją jest opanowanie problemu w przypadku występowania w przewiercanym profilu otworu równocześnie po sobie strefy anomalnie wysokiego ciśnienia złożowego i anomalnie niskiego ciśnienia złożowego (rys. 1).

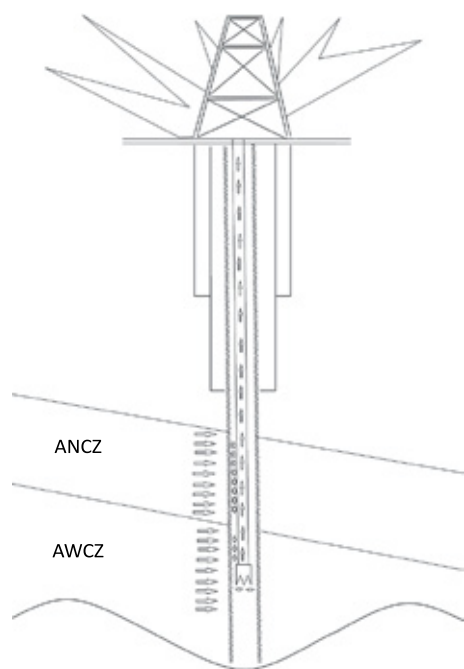
Jeśli strefa anomalnie wysokiego ciśnienia złożowego będzie się znajdować ponad strefą ciśnienia niskiego, to przy



**Rys. 1.** Występowanie strefy anomalnie wysokiego ciśnienia złożowego nad strefą anomalnie niskiego ciśnienia złożowego – rozszczelinowanie strefy chłonnej przez zaczyn cementowy o wysokiej (dostosowanej do AWCZ) gęstości

**Fig. 1.** Occurrence of an anomalously high reservoir pressure zone above the anomalously low reservoir pressure zone – desaturization of the thief zone by a cement slurry of high (adapted to AWCZ) density

zastosowaniu płuczki o gęstości dostosowanej do opanowania ciśnienia w strefie AWCZ może następować ucieczka płuczki i obniżanie się jej poziomu w strefie ANCZ. Powyższe może powodować, że wskutek znacznego zmniejszenia się przeciwcisnienia płyn złożowy przedostanie się do otworu bez większych trudności. Z kolei w przypadku, kiedy strefa wysokiego ciśnienia złożowego usytuowana będzie poniżej strefy anomalnie niskiego ciśnienia złożowego (rys. 2), może nastąpić zjawisko, w którym ciśnienie hydrostatyczne słupa płuczki pomiędzy tymi strefami nie zrównoważy ciśnienia panującego w strefie anomalnie wysokiego ciśnienia, czego



**Rys. 2.** Występowanie strefy anomalnie wysokiego ciśnienia złożowego pod strefą anomalnie niskiego ciśnienia złożowego – możliwość wtargnięcia medium złożowego w strukturę zaczynu o niskiej (dostosowanej do AWCZ) gęstości

**Fig. 2.** Occurrence of an anomalously high formation pressure zone under the zone of anomalously low formation pressure – possible intrusion of the formation medium into the structure of the slurry with a low (adapted to AWCZ) density

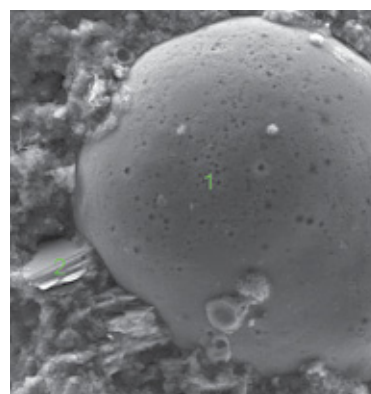
konsekwencją może być migracja płynów lub nawet erupcja (Stryczek et al., 2009).

Jeżeli po przewierceniu strefy anomalnie niskiego ciśnienia złożowego stwierdzi się ucieczkę płuczki, to należy przystąpić do jej opanowania. W przypadku braku możliwości opanowania ucieczki płuczki przerywa się wiercenie i rozpoczyna prace związane z uszczelnieniem strefy anomalnie niskiego ciśnienia złożowego. Do tego celu stosuje się lekkie zaczyny o odpowiednio dobranych parametrach technologicznych, głównie niskiej wartości gęstości, która jest dobierana do danej strefy niskiego ciśnienia złożowego. Uszczelniając strefę ANCZ, wykonuje się korek cementowy o odpowiedniej wysokości, a po związaniu cementu przewierca się go, pozostawiając związany cement w strefie anomalnie niskiego ciśnienia w porach i szczelinach, przez które następowała ucieczka (Stryczek et al., 2014; Sadowski et al., 2017).

Zaczyn o obniżonej gęstości przeznaczony do uszczelniania stref anomalnie niskiego ciśnienia złożowego powinien charakteryzować się w miarę możliwości niską wartością filtracji oraz krótkim czasem gęstnienia, a także odpowiednimi wartościami parametrów reologicznych. Podczas projektowania receptury zaczynu lekkiego jego skład wzbogacany jest o dodatki lekkich frakcji (Al-Yami et al., 2010). Są to różnego rodzaju wypełniacze, np. dodatki redukujące gęstość zaczynów

cementowych. Zmniejszenie gęstości zaczynu cementowego redukuje wartość ciśnienia hydrostatycznego w czasie cementowania, co zapobiega ucieczkom cementu we wspomniane strefy ANCZ. Do dodatków pozwalających obniżyć gęstość zaczynu można zaliczyć następujące wypełniacze (Wiśniowski et al., 2007; Kremieniewski i Stryczek, 2019; Kremieniewski i Kędzierski, 2020):

- perlit – jest to szkło wulkaniczne, które po podgrzaniu do wysokiej temperatury zwiększa swoją objętość. Gęstość masowa perlitu osiąga wówczas  $1,12 \text{ g/cm}^3$ , co umożliwia przygotowanie zaczynu o gęstości około  $1,44 \text{ g/cm}^3$ ;
- gilsonit – to środek wypełniający odkryty w złożach zlokalizowanych w Kolorado w amerykańskim stanie Utah. Występuje on naturalnie jako minerał asfaltowy. Gęstość gilsonitu wynosi około  $1,07 \text{ g/cm}^3$  i przy jego użyciu można również sporządzić zaczyn o niskiej gęstości. Z uwagi na to, że jest to materiał asfaltowy, nie zaleca się stosowania go do sporządzania zaczynów przeznaczonych do uszczelniania otworów o wysokich temperaturach (Nelson, 1990; Kremieniewski, 2020d);
- sproszkowany węgiel – pełni podobne funkcje jak gilsonit. Jego ciężar właściwy wynosi  $1,3 \text{ g/cm}^3$ . Węgiel, podobnie jak gilsonit, stosuje się do obniżania gęstości zaczynu cementowego, jednak nie ma on takich jak gilsonit ograniczeń temperaturowych, ponieważ punkt topnienia węgla wynosi  $538^\circ\text{C}$ ;
- mikrosfera – jest to najczęściej stosowany materiał w branży wiertniczej. Mikrosfera to proszek w postaci małych kulek wypełnionych gazem (rys. 3). Ich ciężar właściwy waha się w przedziale  $0,4\text{--}0,6 \text{ g/cm}^3$ .



**Rys. 3.** Fragment cząsteczki mikrosfery w strukturze stwardniałego zaczynu cementowego (powiększenie 2000 razy)

**Fig. 3.** Fragment of a microsphere particle in the structure of the hardened cement slurry (magnification 2000x)

Zastosowanie dodatku lekkich frakcji pozwala na znaczne obniżenie wartości gęstości, jednak zaprojektowanie receptury zaczynu lekkiego stanowi pewnego rodzaju wyzwanie dla inżynierów (Kremieniewski, 2017; Kremieniewski et al., 2021a).

Związane jest to z faktem, że zaczyn cementowy zawiera również w swym składzie frakcje o większej gęstości (Blanco et al., 2000). Odpowiednio zaprojektowany zaczyn cementowy powinien wykazywać homogeniczną strukturę zarówno w formie płynnej, jak i stałej po związaniu. Jednak może się zdarzyć, że dodatki lekkie będą ulegać frakcjonowaniu, i to niekorzystne zjawisko należy wyeliminować ((Stryczek et al., 2005; Dohnalik i Zalewska, 2013; Shabbar et al., 2017; Kremieniewski et al., 2021b). W tym celu podczas projektowania zaczynu przeznaczonego do konkretnych warunków geologiczno-technicznych badaniom poddaje się zarówno stosowane dodatki, jak i zaczyn zawierający te dodatki (Brown i Ferg, 2005; Stryczek et al., 2016; Jordan et al., 2018). Opierając się na takiej kompleksowej analizie zachowania się danych dodatków w recepturze zaczynu, można ocenić ich przydatność w technologii zaczynów cementowych i na tej podstawie określić możliwości zapobiegania komplikacji w otworze wiertniczym poprzez zastosowanie zaczynu o obniżonej gęstości, co zostało omówione w dalszej części niniejszej publikacji.

### Przebieg prac badawczych

Badania laboratoryjne, na podstawie których omówiono możliwość zapobiegania komplikacjom w otworze wiertniczym poprzez zastosowanie zaczynu o obniżonej gęstości, były wykonywane w Laboratorium Zaczynów Uszczelniających INiG – PIB na podstawie norm: PN-85/G-02320 *Cementy i zaczyny cementowe do cementowania w otworach wiertniczych*; PN-EN 10426-2 *Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 2: Badania cementów wiertniczych* oraz API SPEC 10 *Specification for materials and testing for well cements*.

W publikacji przedstawione zostały wyniki prac badawczych nad opracowaniem zaczynów o obniżonej gęstości, które można zastosować w warunkach występowania anomalnie niskich ciśnień złożowych. Do sporządzania receptur użyto dodatku obniżającego gęstość zaczynu (mikrosfery glinokrzemianowej). Receptury zaczynów zaprojektowane zostały dla temperatury 30°C i 50°C, ze względu na to, że komplikacje związane z anomalnie niskim ciśnieniem złożowym występują najczęściej na niewielkich głębokościach. W recepturach zaczynów zastosowane zostały również dodatki i domieszki, które są niezbędne do poprawy parametrów technologicznych zaczynu i powstałego z niego płaszczu cementowego. W zaczynach zawierających lekkie dodatki wypełniające dużym problemem jest wystąpienie frakcjonowania, np. mikrosfer. Skutkuje to brakiem stabilności sedymentacyjnej, wydzielaniem się wody wolnej z zaczynu, a płaszcz cementowy po związaniu takiego zaczynu wykazuje niejednorodność mikrostruktury. W związku z tym w tego

rodzaju zaczynach kluczową rolę odgrywa prawidłowy dobór zarówno jakościowy, jak i ilościowy dodatków i domieszek. Istotne jest wytworzenie zawiesiny poprzez zastosowanie bentonitu w wodzie zarobowej. Bentonit powoduje wzrost wartości granicy płynięcia, dzięki czemu zaczyn nie ulega sedymentacji oraz w niewielkim stopniu wykazuje cechy zaczynu tiksotropowego. Jest to korzystne podczas uszczelniania kolumn rur w rejonie anomalnie niskich ciśnień złożowych. Dodatkowo zaczyn taki dzięki obecności znacznej ilości mikrosfer nie powoduje uszkodzenia strefy przyodwiertowej.

W trakcie prowadzenia badań nad opracowaniem nowych receptur zaczynów przeznaczonych do uszczelniania kolumn w rejonach występowania ewentualnych komplikacji pierwszym etapem było określenie gęstości, stabilności sedymentacyjnej i odstoju wody. Następnie przeprowadzono badania parametrów technologicznych, które decydują o efektywności uszczelniania. Są to parametry reologiczne zaczynu, filtracja zaczynu w warunkach dynamicznych i czas gęstnienia w warunkach HPHT<sup>1</sup>. W tabeli 1 przedstawione są składy receptur zaczynów, natomiast w tabeli 2 – uzyskane parametry technologiczne zaczynów.

Zaczyn nr 1 w tabeli 1 to receptura kontrolna. Jest to skład, który był stosowany podczas zabiegu cementowania otworu G<sup>2</sup>. Zaczyn ten sporządzono na osnowie innego rodzaju dodatków (DS) niż środki użyte podczas projektowania kolejnych receptur. W zaczynie nr 2 do obniżenia gęstości zastosowano mikrosferę glinokrzemianową, natomiast w zaczynie nr 3 dodatkowo użyto lateksu. Zaczyny nr 2 i 3 to receptury do warunków otworowych z temperaturą 30°C i ciśnieniem 3 MPa. Zaczyny nr 4 i 5 to receptury do warunków otworowych z temperaturą 50°C i ciśnieniem około 10 MPa. Zaczyn nr 4 zawiera mikrosferę glinokrzemianową podobnie jak receptura nr 2, natomiast zaczyn nr 5 to odpowiednik receptury nr 3 i skład ten wzbogacony jest o dodatek lateksu.

Receptura kontrolna nr 1 to zaczyn o zawartości 15% mikrosfer glinokrzemianowych; do wypełnienia przestrzeni międzyziarnowej matrycy cementowej zastosowano 10% mikrocementu. Współczynnik wodno-cementowy<sup>3</sup> zaczynu wynosił 0,98. Zaczyn miał gęstość 1440 kg/m<sup>3</sup> i wykazywał 0,4% odstoju wody (tab. 2). W zaczynie zaobserwowano brak stabilności sedymentacyjnej i podczas pomiaru gęstości w trzech punktach pomiarowych kolumny sedymentacyjnej uzyskano wartości: 1410 kg/m<sup>3</sup> w części górnej, 1440 kg/m<sup>3</sup> w części środkowej oraz 1480 kg/m<sup>3</sup> w dolnej. Frakcjonowanie zaczynu mogło wiązać się z jego niskimi wartościami parametrów

<sup>1</sup> HPHT – (z ang. *high pressure, high temperature*) pomiar prowadzony w warunkach podwyższonego ciśnienia i podwyższonej temperatury.

<sup>2</sup> Z uwagi na poufność danych nazwa otworu jest zakodowana.

<sup>3</sup> Współczynnik wodno-cementowy to ilość wody w zaczynie w stosunku do ilości cementu.



**Tabela 1.** Składy wytypowanych zaczynów do zastosowania w warunkach otworowych w temperaturze 30°C i 50°C oraz pod ciśnieniem około 3 MPa i 10 MPa

**Table 1.** Compositions of selected slurries for borehole conditions with a temperature of approx. 30°C and 50°C as well as a pressure of about 3 MPa and 10 MPa

Skład zaczynów		Zaczyn 1 bazowy	Zaczyn 2	Zaczyn 3	Zaczyn 4	Zaczyn 5
			temperatura 30°C, ciśnienie 3 MPa		temperatura 50°C, ciśnienie 10 MPa	
Współczynnik wodno-cementowy		0,98	1,0	0,9	1,0	0,9
Bentonit	[%] bwow <sup>2</sup>	1,50	2,0	1,5	2,0	1,5
Środek odpieniający	[%] bwoc <sup>3</sup>	0,50 <sup>1</sup>	0,5	0,5	0,5	0,5
Środek upłynniający		0,10 <sup>1</sup>	0,3	0,3	0,3	0,3
Środek antyfiltracyjny		0,50 <sup>1</sup>	0,4	0,4	0,4	0,4
Akcelerator wiązania		–	3,0	3,0	2,0	2,0
Lateks		–	–	10,0	–	10,0
Stabilizator lateksu		–	–	1,0	–	1,0
Mikrosfera		15,00	40,0	40,0	40,0	40,0
Mikrocement		10,00	–	–	–	–
Cement CEM G	[%]	100,00	100,0	100,0	100,0	100,0

<sup>1</sup> Zastosowano inny rodzaj środków (DS),

<sup>2</sup> bwow – (z ang. *by weight of water*) – procentowy udział składnika wyrażony jest w stosunku do ilości wody zarobowej,

<sup>3</sup> bwoc – (z ang. *by weight of cement*) – procentowy udział składnika wyrażony jest w stosunku do ilości cementu.

**Tabela 2.** Parametry technologiczne badanych receptur zaczynów do zastosowania w warunkach otworowych w temperaturze 30°C i 50°C oraz pod ciśnieniem około 3 MPa i 10 MPa

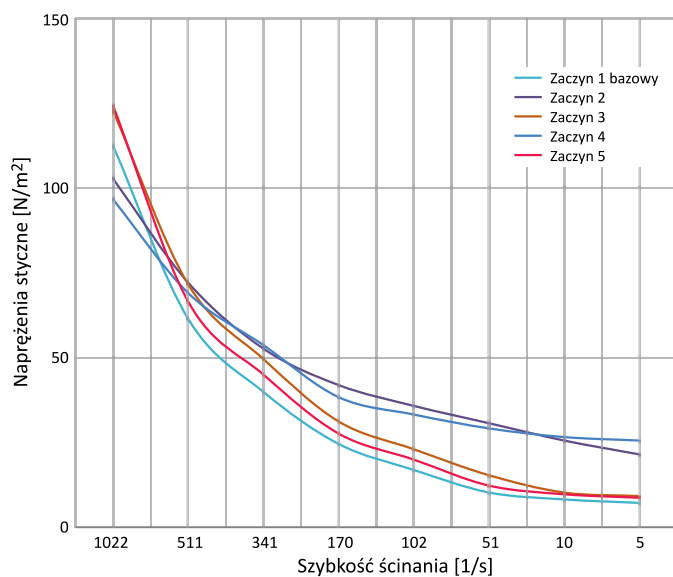
**Table 2.** Technological parameters of the tested slurries for borehole conditions with a temperature of approx. 30°C and 50°C as well as a pressure of about 3 MPa and 10 MPa

Parametr		Zaczyn 1 bazowy	Zaczyn 2	Zaczyn 3	Zaczyn 4	Zaczyn 5
Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]		1440	1260	1220	1270	1220
Odstój wody [%]		0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Filtracja [cm <sup>3</sup> /30 min]		290	214	91,0	208	180
Lepkość plastyczna [mPa·s]		54,0	58,5	96,0	90,0	94,5
Granica płynięcia [Pa]		1,44	30,0	13,92	21,6	10,8
Stabilność sedymentacyjna Gęstość w części kolumny [kg/m <sup>3</sup> ]	góra	1410	1260	1220	1270	1220
	środek	1440	1260	1220	1270	1220
	dół	1480	1260	1220	1270	1220
Czas gęstnienia [godz:min] Czas dojścia do temperatury: 30°C = 10 min; 50°C = 50 min	30 Bc	4:22	4:37	3:00	5:15	4:01
	100 Bc	4:48	5:12	3:38	5:40	4:40

reologicznych. Krzywa płynięcia charakteryzuje się najniższym przebiegiem w grupie analizowanych zaczynów (rys. 4). Granica płynięcia zaczynu wynosiła 1,44 Pa, natomiast filtracja była równa 290 cm<sup>3</sup>/30 min. Uzyskane wyniki badań zestawiono w tabeli 2.

W zaczynie nr 2 zastosowano 40% mikrosfer w stosunku do masy cementu. Nieznacznie zwiększono ilość wody i współczynnik wodno-cementowy wynosi 1. W zaczynie tym oraz pozostałych (składy nr 3 do 5) nie zastosowano dodatku mikrocementu. Poprzez wprowadzenie akceleratora

wiązania oraz bentonitu w ilości większej niż w zaczynie bazowym (tab. 1) uzyskano wzrost parametrów reologicznych pozwalający utrzymać w całej objętości zaczynu wypełniacz lekki w postaci mikrosfery glinokrzemianowej. Takie działanie miało na celu poprawę stabilności sedymentacyjnej przy niemal tej samej ilości wody w zaczynie. Zastosowano również inny środek odpieniający, upłynniający i antyfiltracyjny. Po wprowadzeniu takiego rodzaju modyfikacji zaczyn miał znacznie niższą gęstość (1260 kg/m<sup>3</sup>) niż zaczyn kontrolny. Jest to wymagana cecha zaczynu, ponieważ niższa gęstość



Rys. 4. Przebieg wartości krzywych płynięcia omawianych receptur zaczynów cementowych

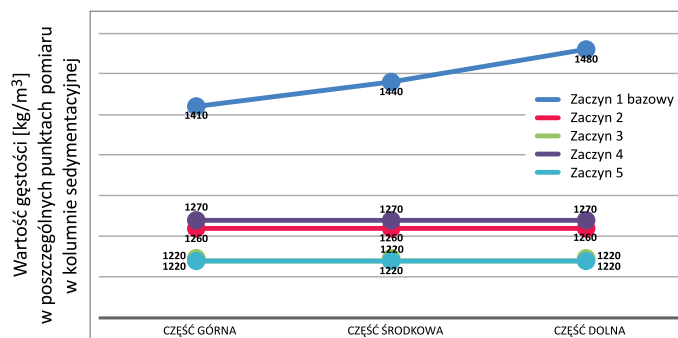
Fig. 4. The course of values of the flow curves of the discussed cement slurries

(dostosowana do warunków geologicznych) oraz brak frakcjonowania dają możliwość stosowania zaczynu w rejonie anomalnie niskich ciśnień złożowych. Stabilność sedymentacyjna zaczynu potwierdzona jest jednakowymi wartościami gęstości we wszystkich punktach pomiaru (rys. 5).

Mimo większej niż w zaczynie kontrolnym zawartości zarówno wody, jak i mikrosfer glinokrzemianowych zaczyn wykazywał homogeniczność oraz nie odnotowano odstoju wody (tab. 2). Jest to efektem podwyższonych wartości parametrów reologicznych, gdzie krzywa płynięcia (rys. 4) ma wysokie wartości naprężeń stycznych przy średnich wartościach szybkości ścinania. Granica płynięcia zaczynu wynosiła 30 Pa. Ze względu na dużą zawartość mikrosfer filtracja zaczynu nieznacznie się obniżyła w porównaniu do receptury kontrolnej i wynosiła 214 cm<sup>3</sup>/30 min.

Trzeci zaczyn to receptura analogiczna do zaczynu nr 2, ale zmniejszono ilość wody do w/c = 0,9; zastosowano też mniej bentonitu oraz wprowadzono 10-procentową koncentrację lateksu. Takie zmiany pozwoliły uzyskać gęstość równą 1220 kg/m<sup>3</sup>. Filtracja zaczynu została zredukowana do wartości 91 cm<sup>3</sup>/30 min. Zaczyn nie wykazywał odstoju wody i był stabilny sedymentacyjnie mimo niewielkiej wartości granicy płynięcia, równej 13,9 Pa (tab. 2), oraz niższego niż w zaczynie nr 2 przebiegu krzywej płynięcia (rys. 4).

Receptury oznaczone numerami 4 i 5 to składy przeznaczone do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w warunkach geologicznych w temperaturze około 50°C i pod ciśnieniem około 10 MPa. W zaczynie oznaczonym nr 4 zastosowano ilość wody taką jak w zaczynie nr 2, który nie miał dodatku mikrosfer, ale był przeznaczony do niższej temperatury. Ze względu



Rys. 5. Zestawienie wartości gęstości stwardniałego zaczynu w zależności od miejsca pomiaru w kolumnie sedymentacyjnej

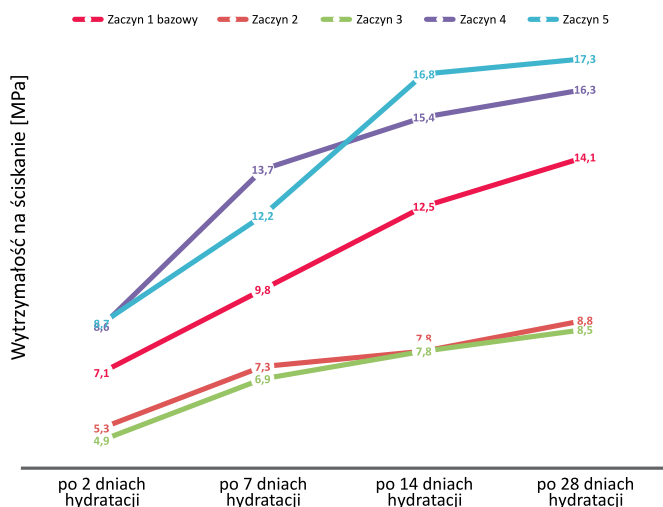
Fig. 5. Summary of the density of the hardened slurry depending on the place of measurement in the sedimentation column

du na wyższą temperaturę stosowania zaczynu nr 4 użyto mniej (2% bwow) akceleratora wiązania. Tak sporządzony zaczyn miał gęstość 1270 kg/m<sup>3</sup>, a jego filtracja wynosiła 208 cm<sup>3</sup>/30 min. Zaczyn był stabilny sedymentacyjnie i nie wykazywał odstoju wody. Granica płynięcia zaczynu wynosiła 21,6 Pa (tab. 2), a wartości naprężeń stycznych przebiegały podobnie wysoko jak w zaczynie nr 2, co przedstawia rysunek 4.

Piąty zaczyn zawiera – podobnie jak receptura nr 3 – 40% mikrosfer glinokrzemianowych. Również w tym zaczynie ze względu na wyższą temperaturę wiązania w otworze użyto mniejszej koncentracji akceleratora wiązania. Tak sporządzony zaczyn miał gęstość 1220 kg/m<sup>3</sup>, nie wykazywał odstoju wody, a wartość filtracji wynosiła 180 cm<sup>3</sup>/30 min. Granica płynięcia zaczynu wynosiła 10,8 Pa. Zaczyn cechowała stabilność sedymentacyjna, objawiająca się tymi samymi wartościami gęstości we wszystkich punktach pomiaru w kolumnie sedymentacyjnej, co przedstawione jest na rysunku 5.

Analizując uzyskane wartości parametrów mechanicznych (rys. 6), zaobserwowano, że stwardniały zaczyn cementowy z próbki kontrolnej (nr 1) miał średnie wartości wytrzymałości na ściskanie. Uzyskano wartości od 7,1 MPa po 2 dniach hydratacji do 14,1 MPa po 28 dniach hydratacji. Zaczyny nr 2 i 3, przeznaczone do uszczelniania otworów w warunkach geologicznych w temperaturze ok. 30°C, posiadały najniższe wartości wytrzymałości. Takie zachowanie może być związane z obecnością 3% akceleratora wiązania. Dodatkowo obecność 40-procentowej koncentracji mikrosfery glinokrzemianowej powoduje obniżenie wartości wytrzymałości na ściskanie. W zaczynach nr 2 i 3 odnotowano wytrzymałość na ściskanie w zakresie od 4,9 MPa po 2 dniach hydratacji do 8,8 MPa po 28 dniach hydratacji. Zaobserwowano również, że zaczyn bez dodatku lateksu (nr 2) cechowała minimalnie wyższa wytrzymałość na ściskanie. Natomiast zaczyny oznaczone numerami 4 i 5, przeznaczone do uszczelniania otworów w warunkach geologicznych w temperaturze około 50°C, charakteryzowały się wyższymi wartościami wytrzymałości mechanicznej niż

zaczyn bazowy. Odnotowano wartości od 8,6 MPa po 2 dniach hydratacji zaczynu do 17,3 MPa po 28 dniach wiązania stwardniałego zaczynu cementowego. Wyższa wytrzymałość może być efektem zastosowania mniejszej ilości akceleratora wiązania oraz wyższej temperatury i ciśnienia hydratacji zaczynu. Zaobserwowano również, że zaczyn nr 5, z dodatkiem 10% lateksu, ma niższe wartości wytrzymałości w początkowym okresie hydratacji (pierwsze 10 dni) niż zaczyn bez dodatku lateksu. Natomiast w późniejszym etapie wiązania (od 14 do 28 dni) wytrzymałość próbki stwardniałego zaczynu z dodatkiem lateksu jest wyższa niż próbki bez lateksu. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie prezentuje rysunek 6.

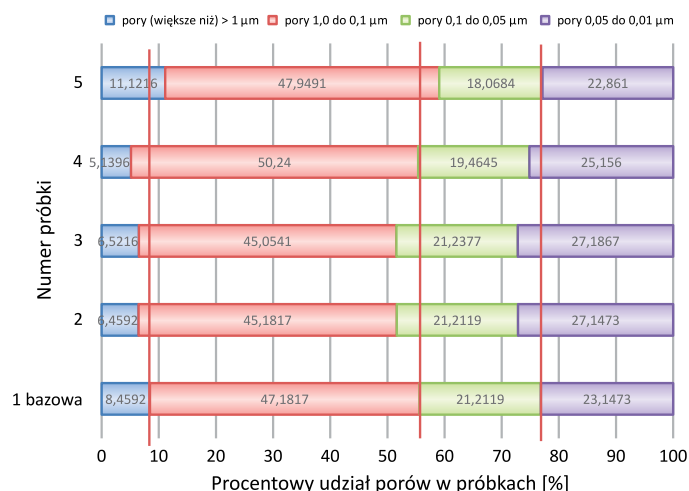


Rys. 6. Porównanie uzyskanych wartości wytrzymałości na ściskanie

Fig. 6. Comparison of obtained compressive strength values

Na próbkach stwardniałych zaczynów cementowych wykonane zostały również badania mikrostruktury porowej.

Po 28-dniowym okresie hydratacji wykonano testy, na podstawie których przeprowadzono analizę procentowego udziału porów należących do przedziałów o określonym zakresie średnic. Aby zminimalizować migrację gazu przez strukturę płaszczu cementowego, konieczne jest uzyskanie przewagi udziału przestrzeni porowych o najmniejszych średnicach w stosunku do udziału porów o dużych średnicach. Na podstawie otrzymanych wyników, zestawionych na rysunku 7, gdzie zobrazowano procentowy udział porów dla poszczególnych próbek, można stwierdzić, że największy udział przestrzeni porowych o największych średnicach (kolor niebieski) ma próbka z zaczynu bazowego nr 1 oraz próbka z zaczynu nr 5. Natomiast najmniejszy udział dużych przestrzeni porowych cechuje próbki o numerach 2, 3 i 4. Kolorem fioletowym zaznaczono udział procentowy porów najmniejszych, w zakresie od 0,05 mikrometra do 0,01 mikrometra. Takich porów, które nie biorą udziału w przepuszczalności stwardniałego zaczynu cementowego, najwięcej zaobserwowano w próbkach, które



Rys. 7. Procentowy udział porów o określonym zakresie średnic  
Fig. 7. Percentage of pores with a specific diameter range

jednocześnie miały najmniejszy udział dużych przestrzeni porowych, czyli próbkach z zaczynów nr 2, 3, 4. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że płaszcz cementowy z tych zaczynów mimo dużej koncentracji mikrosfery glinokrzemianowej będzie się charakteryzował najniższym współczynnikiem przepuszczalności dla gazu.

### Wnioski

Na podstawie zrealizowanych prac badawczych sformułowane zostały następujące wnioski:

- 1) Zaczyn bazowy nie wykazuje stabilności sedymentacyjnej. Jest to związane z najniższym przebiegiem wartości krzywej płynięcia. Na podstawie powyższego można stwierdzić, że frakcjonowanie dodatku lekkiego jest ściśle powiązane z wartościami parametrów reologicznych, a najbardziej z wartością granicy płynięcia zaczynu.
- 2) Wprowadzenie do zaczynu domieszki aktywatora wiązania w koncentracji od 2% do 3% wpływa na wzrost parametrów reologicznych. Takie działanie powoduje wyeliminowanie frakcjonowania lekkiego dodatku w zaczynie cementowym przeznaczonym do stosowania w warunkach możliwego wystąpienia komplikacji wiertniczych na skutek ANCZ.
- 3) Obecność 3% bwoc aktywatora wiązania w zaczynie cementowym wpływa na skrócenie czasu gęstnienia w zaczynie w niższej temperaturze (30°C), natomiast zmniejszenie koncentracji aktywatora wiązania do 2% wpływa na poprawę parametrów mechanicznych zaczynów w temperaturze około 50°C.
- 4) Zaczyn cementowy nieposiadający stabilności sedymentacyjnej tworzył anizotropową mikrostrukturę płaszczu cementowego.

- 5) Wprowadzenie do receptury zaczynu większej ilości mikrosfery glinokrzemianowej wraz z aktywatorem wiązania wpływa na wzrost parametrów reologicznych zaczynu, a tym samym na poprawę stabilności sedymentacyjnej.
- 6) Zaprezentowane w publikacji receptury zaczynów charakteryzują się optymalnymi wartościami parametrów technologicznych do zastosowania ich podczas uszczelniania otworów wiertniczych w warunkach występowania komplikacji związanych z anomalnie niskim ciśnieniem złożowym bądź w strefach słabozwiązłych.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Analiza możliwości regulowania współczynnika przewodności cieplnej stwardniałego zaczynu cementowego* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW, nr zlecenia: 0015/KW/2021, nr archiwalny: DK-4100-0003/2021.

## Literatura

- Al-Yami A.S., Nasr-El-Din H.A., Al-Humaidi A.S., Al-Saleh S.H., Al-Arfaj M.K., 2010. Evaluation and Optimization of Low-Density Cement: Laboratory Studies and Field Application. *Society of Petroleum Engineers*. DOI: 10.2118/113090-PA.
- Blanco F., García P., Mateos P., Ayala J., 2000. Characteristics and properties of lightweight concrete manufactured with cenospheres. *Cem. Concr. Res.*, 30(11): 1715–1722. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00357-4.
- Brown D.L., Ferg T.E., 2005. The Use of Lightweight Cement Slurries and Downhole Chokes on Air-Drilled Wells. *Society of Petroleum Engineers*. DOI: 10.2118/84561-PA.
- Chung S.-Y., Abd Elrahman M., Stephan D., Kamm P.H., 2018. The influence of different concrete additions on the properties of lightweight concrete evaluated using experimental and numerical approaches. *Constr. Build. Mater.*, 189: 314–322. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.189.
- Daou F., Piot B.M., 2009. Cement-Slurry Performance and Set-Cement Properties vs. Microsilica Densification. *Society of Petroleum Engineers*. DOI: 10.2118/112701-PA.
- Dohnalik M., Zaleska J., 2013. Korelacja wyników laboratoryjnych uzyskanych metodą rentgenowskiej mikrotomografii, jądrowego rezonansu magnetycznego i porozymetrii rてciowej. *Nafta-Gaz*, 10: 735–743.
- Jordan A., Permites R., Albrighton L., 2018. Low-density, lightweight cement tested as alternative to reduce lost circulation, achieve desired top of cement in long horizontal wells. *Drilling Contractor*, September/October: 62–64.
- Kremieniewski M., 2017. Poprawa stabilności sedymentacyjnej zaczynu cementowego. *Nafta-Gaz*, 4: 242–249. DOI: 10.18668/NG.2017.04.04.
- Kremieniewski M., 2020a. Analiza parametrów technologicznych wybranych zaczynów lekkich stosowanych do uszczelniania płytkich otworów o temperaturze do 45°C. *Nafta-Gaz*, 10: 710–718. DOI: 10.18668/ng.2020.10.06.
- Kremieniewski M., 2020b. Receptura zaczynu lekkiego do uszczelniania otworów w strefie niskich ciśnień złożowych. *Nafta-Gaz*, 9: 577–584. DOI: 10.18668/NG.2020.09.03.
- Kremieniewski M., 2020c. Recipe of Lightweight Slurry with High Early Strength of the Resultant Cement Sheath. *Energies*, 1583: 1–13. DOI: 10.3390/en13071583.
- Kremieniewski M., 2020d. Ultra-Lightweight Cement Slurry to Seal Wellbore of Poor Wellbore Stability. *Energies*, 3124: 1–18. DOI: 10.3390/en13123124.
- Kremieniewski M., 2020e. Zaczyny do uszczelniania otworów w warunkach niskich wartości gradientów ciśnienia szczelinowania skał oraz do prac rekonstrukcyjnych. *Nafta-Gaz*, 2: 102–109. DOI: 10.18668/NG.2020.02.04.
- Kremieniewski M., Jasiński B., Zima G., Kut Ł., 2021a. Reduction of Fractionation of Lightweight Slurry to Geothermal Boreholes. *Energies*, 3686: 1–11. DOI: 10.3390/en14123686.
- Kremieniewski M., Kędziński M., 2020. Wpływ wybranych domieszek obniżających gęstość na parametry zaczynu cementowego. *Nafta-Gaz*, 3: 143–153. DOI: 10.18668/NG.2020.03.01.
- Kremieniewski M., Stryczek S., 2019. Zastosowanie cementu wysokoglinowego do sporządzania zaczynów uszczelniających w technologiach wiertniczych. *Cement Wapno Beton*, 22/84(3): 215–226.
- Kremieniewski M., Wiśniowski R., Stryczek S., Orłowicz G., 2021b. Possibilities of Limiting Migration of Natural Gas in Boreholes in the Context of Laboratory Studies. *Energies*, 4251: 1–13. DOI: 10.3390/en14144251.
- Nelson E.B. (ed.), 1990. Well Cementing. *Schlumberger Educational Service, Houston, Texas, USA*.
- Peng Y., Jacobsen S., 2013. Influence of water/cement ratio, admixtures and filler on sedimentation and bleeding of cement paste. *Cement and Concrete Research*, 54: 133–142. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.09.003.
- Sadowski Ł., Popek M., Czarnecki S., Mathia T.G., 2017. Morphogenesis in solidification phases of lightweight concrete surface at early ages. *Constr. Build. Mater.*, 148: 96–103. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.026.
- Shabbar R., Nedwell P., Wu Z., 2017. Mechanical properties of lightweight aerated concrete with different aluminum powder content. *MATEC Web of Conf.*, 120: 02010. DOI: 10.1051/mateconf/201712002010.
- Stryczek S., Gonet A., Wiśniowski R., 2005. Wpływ wybranego dodatku mineralnego na własności technologiczne zaczynów cementowych. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz*, 22(1): 333–341.
- Stryczek S., Wiśniowski R., Gonet A., Ferens W., 2009. Parametry reologiczne świeżych zaczynów uszczelniających w zależności od czasu ich sporządzania. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz*, 26(1–2): 369–382.
- Stryczek S., Wiśniowski R., Gonet A., Złotkowski A., 2014. The influence of time of rheological parameters of fresh cement slurries. *AGH Drilling, Oil, Gas*, 31: 123–133. DOI: 10.7494/drill.2014.31.1.123.
- Stryczek S. (red.), Wiśniowski R., Uliasz-Misiak B., Złotkowski A., Kotwica Ł., Rzepka M., Kremieniewski M., 2016. Studia nad doбором zaczynów uszczelniających w warunkach wiercenia w basenie pomorskim. *Wydawnictwo AGH, Kraków*.
- Wiśniowski R., Stryczek S., Skrzypaszek K., 2007. Kierunki rozwoju badań nad reologią płynów wiertniczych. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz*, 24: 595–607.

## Akty prawne i dokumenty normatywne

- PN-85/G-02320 *Cementy i zaczyny cementowe do cementowania w otworach wiertniczych*.
- PN-EN 10426-2 *Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 2: Badania cementów wiertniczych*.
- API SPEC 10 *Specification for materials and testing for well cements*.



Dr inż. Marcin KREMIEŃEWSKI  
Adiunkt w Zakładzie Technologii Wiercenia  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: marcin.kremieniewski@inig.pl