

**Stanisław Stryczek\*, Andrzej Gonet\*, Rafał Wiśniowski\***

**WPLYW WSPÓLCZYNNIKA WODNO-CEMENTOWEGO  
NA PARAMETRY TECHNOLOGICZNE ŚWIEŻYCH ZACZYNÓW  
SPORZĄDZONYCH NA OSNOWIE  
CEMENTÓW WIELOSŁADNIKOWYCH\*\***

**1. WSTĘP**

W miarę rozwoju technologii cementowania rur okładzinowych i uszczelniania poziomów skał zbiornikowych, wciąż można napotkać na szereg nowych problemów, dla których opracowuje się coraz to nowsze receptury zaczynów uszczelniających.

Zaczyny uszczelniające odgrywają bardzo ważną rolę w technologiach wiertniczych. Mają one za zadanie między innymi uszczelnienie przestrzeni pierścieniowej pomiędzy ścianą otworu a rurami okładzinowymi oraz likwidację stref chłonnych górotworu. Stosowane są również w budownictwie hydrotechnicznym i geoinżynierii.

Dobór odpowiedniego zaczynu w żadnym wypadku nie może być dziełem przypadku, czy też wynikiem nie do końca zrealizowanych badań laboratoryjnych. Od prawidłowego wykonania cementowania zależą dalsze prace wiertnicze, a co za tym idzie – prawidłowe działanie i eksploatacja powstałego odwiertu.

Do prac związanych z uszczelnianiem i wzmocnianiem gruntów i skał oraz cementowania kolumn rur okładzinowych należy stosować cementy specjalne, które swoim działaniem oraz cechami technologicznymi i wytrzymałościowymi będą mogły sprostać ekstremalnym warunkom geologicznym, temperaturowym i ciśnieniowym oraz muszą być odporne na działanie agresywnych płynów złożowych.

Zaczyn cementowy powinien charakteryzować się odpowiednimi właściwościami reologicznymi, konsystencją po zarobieniu, czasem przetłaczania, niską filtracją, nieprzepuszczalnością dla mediów złożowych oraz właściwym czasem twardnienia [1, 8].

---

\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

\*\* Praca naukowa finansowana ze środków KBN w latach 2004–2005 jako projekt badawczy nr 4 T12A 050 27

Aby dokonać prawidłowego doboru typu zaczynu uszczelniającego dla danych warunków panujących w górotworze, konieczna jest znajomość wpływu dodatków mineralnych na kształtowanie właściwości technologicznych świeżych oraz stwardniałych zaczynów.

W ostatnich latach prowadzone są intensywne badania nad dalszym rozwojem spoiw i zaczynów żużlowo-alkalicznych w kierunku otrzymania nowej generacji spoiw specjalnych zwanych geopolimerami. Zaczyny na bazie geopolimerów mające w swym składzie wyłącznie składniki pochodzenia nieorganicznego otrzymuje się poprzez modyfikację zawartości odpowiednio zestawionych i przygotowanych zaczynów cementowych i żużlowo-alkalicznych, modyfikowanych metakaolinem lub produktami dehydratacji minerałów ilastych o właściwościach pucolanowych, a także zarodków naturalnych zeolitów [2, 4].

W roku 2004 w ofercie handlowej Górażdże Cement S.A. pojawił się nowy rodzaj cementu tzw. Cement wieloskładnikowy CEM V. W związku z powyższym, tezą tej pracy było stwierdzenie, że: „zaczyny cementowe sporządzane na osnowie cementu wieloskładnikowego mogą być stosowane w technologiach wiertniczych oraz w pracach geoinżynierskich wykonywanych metodami iniekcji otworowej” [3].

## 2. CEMENTY WIELOSKŁADNIKOWE

Według wymagań normy PN-EN 177-1 w skład cementu mogą wchodzić następujące dodatki mineralne:

- granulowany żużel wielkopiecowy (S);
- pucolanowy:
  - naturalny (P),
  - sztuczny (Q);
- popiół lotny:
  - krzemionkowy (V),
  - wapienny (W);
- łupek palony (T);
- kamień wapienny (L, LL);
- pył krzemionkowy (D).

Nowym rodzajem cementu powszechnego użytku są cementy wieloskładnikowe CEM V. W zależności od koncentracji dodatków (klinkier, żużel wielkopiecowy, pucolany, popioły krzemionkowe), cementy wieloskładnikowe mogą występować jako:

- CEM V/A,
- CEM V/B.

Cechami charakterystycznymi tej grupy cementów są:

- umiarkowana dynamika narastania wytrzymałości wczesnej,
- umiarkowane ciepło hydratacji,
- wydłużone czasy wiązania w stosunku do cementu portlandzkiego CEM I,
- wysoka odporność na agresję chemiczną,
- wysoka wytrzymałość po dłuższym okresie dojrzewania,
- niższy skurcz od cementów CEM I.

Granulowany żużel wielkopieczowy (S) zawarty w cemencie wpływa na strukturę i mikrostrukturę stwardniałego zaczynu cementowego. Podstawowym składnikiem fazowym stwardniałego zaczynu cementu żużlowego jest faza CSH. Ponadto występuje w zaczynie zmniejszona ilość portlandu i uwodnionych glinianów wapniowych, które są odporne na korozję chemiczną. Pojawia się nowa faza – hydrogelenit ( $C_2ASH_8$ ), która wykazuje zwiększoną odporność na korozję chemiczną. Morfologia powstających produktów hydratacji wpływa na strukturę porów: wzrasta liczba porów żelowych, a maleje liczba porów kapilarnych [4, 5].

Krzemionkowy popiół lotny (V) jest szeroko stosowanym dodatkiem mineralnym w produkcji cementu ze względu na jego aktywność pucolanową, tj. zdolność wiązania przez aktywne składniki popiołu lotnego ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ) wodorotlenku wapniowego (zazwyczaj pochodzącego z hydratacji faz krzemionkowych cementu) w obecności wilgoci, z utworzeniem związków o właściwościach hydraulicznych, głównie uwodnionych krzemianów i glinianów wapniowych.

Głównym składnikiem fazowym popiołu lotnego jest szkliwo glinokrzemianowe. Do czynników wpływających na reaktywność popiołów lotnych z cementem zaliczyć należy – obok składu chemicznego i mineralnego – także miarkość, morfologię ziaren oraz czynniki wpływające aktywizująco na przebieg reakcji pucolanowej (przemiał, obróbka termiczna, stosowanie dodatków chemicznych) [8].

Wprowadzanie popiołu lotnego do składu cementu modyfikuje szereg jego właściwości. Czas wiązania cementu popiołowego jest znacznie dłuższy w porównaniu z czasem wiązania cementu portlandzkiego. Skala wydłużenia czasu zwiększa się wraz z ilością dodanego popiołu lotnego. Należy zaznaczyć, że na czas wiązania istotny wpływ ma także temperatura, w jakiej przebiega proces wiązania i twardnienia cementu.

Cechą charakterystyczną cementu z dodatkiem popiołów jest dosyć wolna dynamika narastania wytrzymałości w początkowej fazie twardnienia. Wiąże się to ze stosunkowo wolnym przebiegiem reakcji pucolanowej i jej wpływem na właściwości mechaniczne stwardniałych zaczynów. Natomiast w dłuższym okresie dojrzewania wytrzymałość cementu z popiołem osiąga wartości przewyższające wytrzymałość na ściskanie cementu portlandzkiego tej samej klasy wytrzymałościowej.

Wolnemu przyrostowi wytrzymałości na ściskanie cementu popiołowego w okresie początkowym towarzyszy umiarkowana kinetyka wydzielania ciepła podczas procesów wiązania i twardnienia. Do właściwości istotnych dla użytkownika cementu z dodatkiem popiołów lotnych należy zaliczyć także wysoką odporność na korozyjne oddziaływanie środowisk chemicznych, wysoką wodoszczelność i ograniczony skurcz [1, 2].

### 3. BADANIA LABORATORYJNE

Ze względu na fakt, że cementy wieloskładnikowe CEM V zostały wyprodukowane pod koniec 2004 roku oraz mechanizm oddziaływania głównych dodatków mineralnych wchodzących do cementu, podjęto badania laboratoryjne, których celem było stwierdzenie, czy tego rodzaju spoiwo hydrauliczne może być użyte do sporządzania zaczynów uszczelniających stosowanych w technologiach wiertniczych i pracach geoinżynierskich.

Wykonane badania laboratoryjne miały na celu określenie wpływu współczynnika wodno-cementowego ( $w/c$ ) na parametry technologiczne oraz model reologiczny świeżych zaczynów sporządzonych na osnowie cementu wieloskładnikowego CEM V/B.

W skład cementu CEM V/B wchodzi:

- 20 38% klinkieru,
- 31 50% mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego,
- 31 50% pucołany i/lub krzemionkowego popiołu lotnego.

### 3.1. Oznaczanie parametrów technologicznych świeżych zaczynów cementowych

Badania laboratoryjne związane z pomiarem parametrów reologicznych świeżych zaczynów uszczelniających przeprowadzono wg normy:

- PN-85/G-02320: *Wiertnictwo. Cementy i zaczyny cementowe do cementowania w otworach wiertniczych*;
- Norma Amerykańskiego Instytutu Naftowego: *Specification for Materials and Testing for Well Cements*. API Specification 10A, 22nd Edition (1995).

Badania obejmowały pomiar następujących parametrów technologicznych świeżego zaczynu cementowego:

- gęstości – za pomocą wagi Baroid;
- odstoju – za pomocą cylindra pomiarowego;
- rozlewności – za pomocą stożka AzNII;
- lepkości względnej – za pomocą kubka Forda nr 4,
- filtracji – za pomocą prasy filtracyjnej Baroid, stosowanej do badania filtracji płuczek wiertniczych; pomiar przeprowadzano do tzw. „momentu przebicia” zaczynu, tzn. do momentu, kiedy wypływający filtrat z fazy ciągłej przechodził w postać aerozolu;
- czasu wiązania – za pomocą aparatu Vicata;
- właściwości reologicznych (lepkości plastycznej, lepkości pozornej, granicy płynięcia) – za pomocą lepkościomierza obrotowego Chan 35 API Viscometer o 12 prędkościach obrotowych (600, 300, 200, 100, 60, 30, 20, 10, 6, 3, 2, 1 obr./min, co odpowiada następującym szybkościom ścinania: 1022,04; 511,02; 340,7; 170,4; 102,2; 51,1; 34,08; 17,04; 10,22; 5,11; 3,41; 1,70 s<sup>-1</sup>).

Współczynnik wodno-mieszaninowy dla badanych zaczynów uszczelniających wynosił: 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2. Cieczą zarobową była woda wodociągowa o temperaturze 293 K ( $\pm 2$  K). Cement przeznaczony do sporządzania zaczynów (zgodnie z wymaganiami ISO 25911-1 i ISO 3310-1) był przesiewany przez trzy sита z drutu o następujących wymiarach boku oczka kwadratowego: 1,0; 0,20; 0,08 mm. Do sporządzania zaczynów stosowano tylko przesiany cement.

Cement do sporządzania zaczynów uszczelniających miał takie rozdrobnienie, że pozostałość na sicie o boku oczka kwadratowego 0,20 mm nie przekraczała 2%, zaś na sicie o boku oczka kwadratowego 0,08 mm nie była większa niż 20% (PN-85/G-02320: *Cementy i zaczyny cementowe do cementowania w otworach wiertniczych*). Temperatura cementu do badań laboratoryjnych, jak również cieczy zarobowej wynosiła 20°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ) [293 K].

Odmierzone objętości cieczy zarobowej wynikające z założonego współczynnika  $w/c$  wlewano do naczynia plastikowego, a następnie uruchamiano elektryczne mieszadło szyb-

koobrotowe o regularnych obrotach (od 20 do 120 obr./s). Następnie w ciągu 15÷30 sekund dodawano do wody zarobowej uprzednio odważoną masę cementu z równoczesnym mieszaniem tworzącego się zaczynu przy zachowaniu małej prędkości obrotowej mieszadła (20 obr./s). Po dodaniu do wody zarobowej całkowitej masy cementu zwiększano liczbę obrotów mieszadła do 100 obr./s, a czas mieszania tak sporządzonego zaczynu wynosił około 3 min. Tak przygotowany zaczyn poddawano w maksymalnie krótkim czasie (aby wyeliminować sedymentację) badaniu laboratoryjnemu.

#### 4. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ LABORATORYJNYCH

W celu stwierdzenia, w jakim zakresie parametry technologiczne świeżych zaczynów sporządzanych na osnowie cementu wieloskładnikowego CEM V/B różnią się od parametrów zaczynów sprządzanych z innych rodzajów cementu, dodatkowo przebadano zaczyny sporządzone z cementów:

- portlandzkiego CEM I – 32,5;
- hutniczego CEM III/B – 32,5 o składzie:
  - 20÷34% klinkier,
  - 66÷80% granulowany żużel wielkopiecowy;
- hutniczego CEM III/C – 32,5 o składzie:
  - 5÷9%,
  - 81÷95% granulowany żużel wielkopiecowy.

Na podstawie analizy wyników badań parametrów technologicznych świeżych zaczynów cementowych (tab. 1 i 2) można zauważyć, że zaczyny sporządzone na osnowie cementu portlandzkiego mają większą gęstość, filtrację, lepkość plastyczną i względną w porównaniu z cementami posiadającymi w swoim składzie dodatki w postaci mielonego granulowanego żużla wielkopiecowego oraz krzemionkowego popiołu lotnego [9].

**Tabela 1**

Zestawienie parametrów technologicznych zaczynów cementowych

w/c	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]				Odstój [%]				Rozlewność [mm]				Filtracja właściwa [cm <sup>3</sup> /s]			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
0,5	1800	1860	1800	1740	0,0	0,0	0,0	0,0	160	180	170	190	61/11	73/20	58/9	69/12
0,6	1670	1770	1730	1720	2,0	0,8	0,0	0,2	220	210	210	260	78/10	88/17	76/11	85/14
0,8	1560	1610	1600	1600	6,0	4,8	5,0	10,4	> 260	260	260	> 260	96/11	98/15	94/11	118/16
1,0	1460	1500	1490	1490	16,0	12,0	17,0	21,0	> 260	> 260	> 260	> 260	128/15	133/16	123/14	137/19

Oznaczenia zaczynów cementowych:

1 – cement wieloskładnikowy CEM V/B – 32,5;

2 – cement portlandzki CEM I – 32,5;

3 – cement hutniczy CEM III/B – 32,5;

4 – cement hutniczy CEM III/C – 32,5.

**Tabela 2**  
Właściwości reologiczne zaczynów cementowych

$w/c$	Lepkość plastyczna [Pa·s]				Granica płynięcia [Pa]				Lepkość względna [s]			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
0,5	0,1899	0,0912	0,1125	0,0695	14,85	9,01	14,19	10,88	28,1	29,2	27,3	27,1
0,6	0,0417	0,0509	0,0400	0,0304	6,64	4,81	8,11	5,29	18,6	25,8	19,9	18,0
0,8	0,0185	0,0273	0,0190	0,0121	2,74	2,34	3,65	2,02	11,5	18,8	10,0	10,1
1,0	0,0098	0,103	0,0087	0,0083	0,89	0,81	2,09	1,32	10,5	13,2	8,5	9,0

Porównując parametry technologiczne zaczynów sporządzanych z cementów: hutniczego CEM III/B i CEM III/C oraz wieloskładnikowego CEM V/B, można zauważyć, że ich parametry są zbliżone do siebie.

Właściwości reologiczne zaczynów uszczelniających są bardzo istotne zarówno podczas projektowania, jak i realizacji prac związanych z uszczelnianiem i wzmocnianiem górotworu metodami wiertniczymi. Prawidłowo wyznaczone parametry reologiczne umożliwiają racjonalny dobór technologii prac (ciśnienia tłoczenia, oporów przepływu, strumienia objętości tłoczenia) pod kątem uzyskania wysokiej skuteczności realizowanych prac.

Parametry reologiczne obliczono dla następujących modeli [10]:

- Newtona,
- Bingham’a,
- Ostwalda de Waele,
- Cassona,
- Herschela–Bulkleya.

Za najlepszy model reologiczny dla każdego z analizowanych składów badanych zaczynów uszczelniających przyjmowano taki, który charakteryzował się największą wartością współczynnika korelacji.

W tabeli 3 przedstawiono obliczone parametry reologiczne zaczynów cementowych o różnych wartościach współczynnika wodno-cementowego ( $w/c = 0,5 - 1,0$ ).

Na podstawie analizy uzyskanych wyników można stwierdzić, że badanych zaczynów nie można opisywać tylko jednym modelem reologicznym, a zwłaszcza dla współczynników  $w/c = 0,5$  i  $0,6$ .

Analizując parametry reologiczne dla modelu Bingham’a, można zauważyć, że zaczyny cementowe sporządzane z cementu portlandzkiego w zakresie  $w/c \in [0,5 - 1,0]$  są większe w porównaniu z pozostałymi cementami.

Na podstawie analizy parametrów technologicznych świeżych zaczynów sporządzanych z cementu wieloskładnikowego CEM V/B można stwierdzić, że cement ten mógłby być stosowany do sporządzania zaczynów do prac geoinżynierskich.

O pełnej przydatności badanego cementu muszą zdecydować dalsze badania, zwłaszcza parametrów technologicznych stwardniałego zaczynu (wytrzymałość, odporność na korozję, przepuszczalność, porowatość, struktura, tekstura).

**Tabela 3**

Parametry reologiczne zaczynów cementowych o różnych współczynnikach  $w/c$  określone w temp. 20°C dla różnych modeli reologicznych

Parametry reologiczne		Współczynnik wodno-cementowy $w/c$			
		0,5	0,6	0,8	1,0
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,2339	0,052	0,0227	0,0112
	Współczynnik korelacji [-]	0,8916	0,8708	0,8940	0,9631
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,1899	0,0417	0,0185	0,0098
	Granica płynięcia [Pa]	14,85	6,64	2,74	0,89
	Współczynnik korelacji [-]	0,9726	0,9784	0,9870	0,9967
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s <sup>n</sup> ]	4,10	2,11	1,04	0,32
	Wykładnik potęgowy [-]	0,5167	0,4233	0,3922	0,4560
	Współczynnik korelacji [-]	0,9992	0,9867	0,9620	0,9406
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,1311	0,026	0,0111	0,0065
	Granica płynięcia [Pa]	6,38	3,46	1,5	0,44
	Współczynnik korelacji [-]	0,9868	0,9942	0,9985	0,9985
Model Herschela-Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	9,19	1,74	0,0	0,0
	Współczynnik konsystencji [Pa·s <sup>n</sup> ]	1,01	1,00	0,99	0,99
	Wykładnik potęgowy [-]	0,7356	0,5426	0,4266	0,3360
	Współczynnik korelacji [-]	0,9923	0,9979	0,9847	0,9461
Lepkość pozorna przy 1022,04 [s <sup>-1</sup> ] [Pa·s]		0,110	0,045	0,0200	0,0105

## LITERATURA

- [1] Brylicki W.: *Czynniki determinujące trwałość betonów i iniekcyjnych zaczynów cementowych*. Symposium Naukowo-Techniczne „Cementy w budownictwie, robotach wiertniczo-inżynierskich oraz hydrotechnice”, Piła 2001
- [2] Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwaborski J., Śliwiński J.: *Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji*. Opole, Górażdże Cement 2002
- [3] Giergiczny Z., Pużak T., Sokołowski M.: *Poradnik – cementy w ofercie handlowej Górażdże Cement S.A. Rodzaje, właściwości, zastosowanie*. Chorula, 2001
- [4] Kurdowski W.: *Chemia cementu*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN 1991
- [5] Peukert S.: *Cementy powszechnego użytku i specjalne*. Kraków, Polski Cement Sp. z o.o. 2000
- [6] PN-EN 197-1: *Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*

- [7] PN-ISO 10426-1: *Cement i materiały do cementowania otworów. Część 1. Specyfikacja*
- [8] Stryczek S., Gonet A., Brylicki W.: *Pucolanowe zaczyny do prac geoinżynierskich*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, t. 17, 2000
- [9] Terakowski M., Krajewski J.: *Badania popiołów i żużli pochodzących z Elektrowni III (raport za IV kw. 2002 r.)*. Katowice, Instytut Ekologii Terenów Przemysłowych 2002
- [10] Wiśniowski R., Skrzypaszek K.: *Komputerowe wspomaganie wyznaczania modelu reologicznego cieczy – program Flow – Fluid Coef*. Nowoczesne Techniki i Technologie Bezwykopowe, nr 2–3, 2001