

Stanisław Stryczek*, Rafał Wiśniowski*, Bartłomiej Kumala*

**WPLYW SUPERPLASTYFIKATORA
NA PARAMETRY TECHNOLOGICZNE
ZACZYNÓW USZCZELNIAJĄCYCH SPORZĄDZONYCH NA
OSNOWIE CEMENTÓW PORTLANDZKO-POPIOŁOWYCH****

1. WSTĘP

Cement wiertniczy jest i będzie jeszcze przez długie lata najpowszechniej stosowanym materiałem hydraulicznym do sporządzania zaczynów uszczelniających do cementowania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych, jednak nie może on być uważany za spoiwo w pełni uniwersalne.

Coraz bardziej rosnące, a zarazem zróżnicowane wymagania ze strony branży wiertniczej narzucają konieczność modyfikacji właściwości technologicznych zarówno świeżych, jak i stwardniałych zaczynów uszczelniających sporządzanych na osnowie cementów powszechnego użytku lub cementów wiertniczych, a zwłaszcza klasy A, B, C i G [7]. Skuteczną metodą tej modyfikacji jest wprowadzenie w skład receptury zaczynu odpowiednio dobranych co do rodzaju i koncentracji w zaczynie domieszek i dodatków.

Według PN-EN 934-2:2002 *Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Część 2: Domieszki do betonu. Definicje, wymagania, zgodność, znakowanie i etykietowanie* domieszka nazywa się materiał dodawany podczas wykonywania mieszanki betonowej (zaczynu uszczelniającego) w ilości nie większej niż 5% masy suchego cementu w betonie (zaczynie). Domieszki wprowadza się w celu zmodyfikowania właściwości świeżego i stwardniałego zaczynu.

Współczesne technologie sporządzania zaczynów uszczelniających bardzo często muszą być wspomagane produktami chemii materiałów wiążących, które można podzielić na kategorie według [1–4]:

- mechanizmu ich oddziaływania na główne składniki betonu (zaczynu),
- składu chemicznego,

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Praca wykonana w ramach badań statutowych WWiNiG AGH

- podstawowego efektu technologicznego uzyskiwanego wskutek zastosowania odpowiedniej domieszki.

Jako kryterium zaliczania domieszki do danego rodzaju, przyjmuje się spełnianie przez nią wymagań dotyczących podstawowego efektu działania na zaczyn uszczelniający. W przypadku gdy domieszka modyfikuje wyraźnie więcej niż jedną cechę zaczynu, zalicza się ją do domieszek dwufunkcyjnych (kompleksowych) [1, 4].

Biorąc za kryterium sposób oddziaływania, wyróżnia się domieszki (tab. 1) [3]:

- modyfikujące właściwości reologiczne i zawartość powietrza w zaczynie oraz wiązanie i twardość związanego zaczynu,
- ekspansywne,
- zwiększające odporność stwardniałego zaczynu na działanie czynników fizycznych i chemicznych,
- zwiększające przyczepność zaczynu.

Tabela 1

Klasyfikacja domieszek według polskiej normy PN-EN 934-2 [3]

Lp.	Wyszczególnienie
1	Domieszki modyfikujące właściwości reologiczne: 1.1 Domieszki uplastyczniające (plastyfikatory) i upłynniające (superplastyfikatory) 1.2 Domieszki zagęszczające 1.3 Domieszki zwiększające wiązliwość wody
2	Domieszki modyfikujące zawartość powietrza w betonie: 2.1 Domieszki napowietrzające 2.2 Domieszki spieniające 2.3 Domieszki przeciwpieniące
3	Domieszki modyfikujące wiązanie i twardnienie betonu: 3.1 Domieszki przyspieszające wiązanie 3.1 Domieszki przyspieszające początkowy przyrost wytrzymałości 3.2 Domieszki przeciwmrozowe 3.3 Domieszki opóźniające wiązanie
4	Domieszki ekspansywne
5	Domieszki uszczelniające, zwiększające odporność na czynniki fizyczne
6	Domieszki zwiększające odporność na działania czynników chemicznych: 6.1 Domieszki – inhibitory korozji stali 6.2 Domieszki zmniejszające skutki reakcji alkalia-kruszywo 6.3 Domieszki zwiększające odporność na agresję chemiczną 6.4 Domieszki zwiększające odporność na agresję biologiczną
7	Domieszki zwiększające przyczepność betonu
8	Domieszki barwiące beton

Na szczególną uwagę, ze względu na skuteczność uszczelniania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych, zasługują domieszki uplastyczniające (plastyfikatory PL) i upłynniające (superplastyfikatory SP tradycyjne i nowej generacji) wpływające na cechy reologiczne świeżych zaczynów uszczelniających.

Przyjmuje się następujące kryterium podziału tego rodzaju domieszek:

- środki uplastyczniające (tzw. plastyfikatory – PL), pozwalające na zmniejszenie ilości wody w granicach 5–12%;
- środki upłynniające (tzw. superplastyfikatory – SP), pozwalające na zmniejszenie ilości wody o więcej niż 12% (superplastyfikatory nowej generacji umożliwiają znacznie większą redukcję – nawet powyżej 30%).

2. DOMIESZKI UPLASTYCZNIAJĄCE

Domieszki uplastyczniające, zwane plastyfikatorami (PL), są substancjami organicznymi, powierzchniowo czynnymi. Ich działanie polega na częściowym zobojętnieniu ładunków elektrycznych na powierzchni ziaren cementu, co prowadzi do zwiększenia ruchliwości ziaren i zwiększa płynność zaczynu.

Cząsteczki plastyfikatora wykazują również pewne działanie smarne, zwiększające płynność zaczynu. Ponadto hydrofilowe i posiadające ładunek elektryczny grupy funkcyjne plastyfikatora (np. sulfonowe) powodują jednoimienne naładowanie cząstek cementu i ich wzajemne odpychanie, co zwiększa efekt dyspergowania cementu w wodzie, zapobiega sedymentacji i zwiększa płynność zaczynu. Zaczyn cementowy z dodatkiem plastyfikatora sedymentuje znacznie dłużej, a na podstawie pomiaru czasu sedymentacji zaczynów z różnymi plastyfikatorami można ocenić skuteczność plastyfikatora. Plastyfikatory umożliwiają (przy zachowaniu konsystencji zaczynu) obniżenie ilości wody zarobowej o co najmniej 5% (do 15%), dzięki czemu obniża się skurcz zaczynu podczas twardnienia, maleje nasiąkliwość maleje przepuszczalność stwardniałego zaczynu a wytrzymałość końcowa może wzrosnąć do 12%.

Ze względu na sposób oddziaływania na zaczyn można wyróżnić następujące odmiany domieszek uplastyczniających [1, 5, 6]:

- plastyfikująco-opóźniające;
- plastyfikująco-napowietrzające;
- mieszanki z superplastyfikatorami.

Domieszki uplastyczniające dodawane są do wody zarobowej w bardzo niewielkiej ilości ($0,2 \div 0,5\%$ w stosunku do masy suchego cementu). Nadmiar ich jest niekorzystny, gdyż może opóźnić wiązanie i twardnienie zaczynu. Skuteczność działania domieszek uplastyczniających praktycznie nie zależy od zawartości cementu w zaczynie.

Plastyfikatory ze względu na skład chemiczny można uszeregować w sposób następujący:

- a) **Sole kwasów lignosulfonowych – LG** (lignosulfoniany wapniowe, potasowe, sodowe). Związki lignosulfonowe powstają jako produkt uboczny przy produkcji celulozy z drewna metodą siarczynową. Lignosulfoniany wprowadzają zwykle do zaczynu małe ilości powietrza ($2 \div 3\%$) i wykazują także działanie opóźniające. Opóźnienie wią-

zania wzrasta znacznie, gdy dodatek plastyfikatora jest zbyt duży. Opóźniający wpływ na początek wiązania zachodzi w sytuacji, gdy ilości wody zarobowej nie ulega zmniejszeniu. Natomiast przy redukcji ilości wody zarobowej mającej na celu podniesienie wytrzymałości – proces wiązania ulega przyspieszeniu.

- b) **Sole kwasów hydroksykarboksylowych – HK** (Ca, Na, trietanolaminy) np. kwas glikonowy. Związki z tej grupy nie wykazują działania napowietrzającego, także opóźniają wiązanie, co również znacznie wzrasta w przypadku zbyt dużych dawek domieszki. Do domieszek grupy a) i b) wprowadza się dodatki modyfikujące ich działanie, np. przyspieszające wiązanie.
- c) **Związki karbominowe.**
- d) **Polimery hydroksylowe – HP (np. ze skrobi).**
- e) **Nonylofenyle oksyetylowane.**

3. DOMIESZKI UPŁYNNIAJĄCE

Domieszki upłynniające zwane superplastyfikatorami (SP) powodują zmianę sił tarcia, umożliwiając większą dyspersję zaczynu cementowego. Dzięki temu możliwa jest redukcja ilości wody zarobowej nawet o 35% bez zmiany konsystencji zaczynu.

Superplastyfikatory to polimery, których cząsteczki o rozwiniętej budowie liniowej bez bocznych odgałęzień, pozwalają dobrze otaczać ziarna cementu i tym samym skuteczniej na nie działać. Mogą być wprowadzane do zaczynu w większych ilościach – w dawkach około 10-krotnie większych niż plastyfikatory.

Domieszki upłynniające klasyfikuje się w następujące grupy [1–3, 5]:

- sulfonowane żywice melaminowo-formaldehydowe (SMF),
- sulfonowane żywice naftalenowo-formaldehydowe (SNF),
- mieszaniny sulfonatów melaminowo-naftalenowych,
- modyfikowane lignosulfoniany wapniowe lub sodowe (MLS),
- kopolimery kwasu mrówkowego z kwasem naftaleno-sulfonowym lub kwasem metylonaftaleno-sulfonowym,
- modyfikowane sole kwasów lignosulfonowych MLG,
- polikarboksylany (PC),
- sulfonowe aminy aromatyczne AS,
- kopolimery kwasu akrylowego z akrylanami (CAE),
- sieciowane żywice akrylowe (CLAP) – nowa generacja domieszek upłynniających.

Superplastyfikatory nowej generacji są to związki takie, jak polikarboksylany PC (akrylany), kopolimery kwasu akrylowego z estrem akrylowym CAE, sieciowane polimery akrylowe CLAP czy eter polikarboksylowy PAE. Superplastyfikatory te różnią się od tradycyjnych SP sposobem upłynniania zaczynu uszczelniającego.

W przypadku tradycyjnych SP upłynnienie zaczynu następuje w oparciu o tzw. efekt elektrostatyczny, polegający na elektrostatycznym odpychaniu zjonizowanych grup $-\text{SO}_3^-$. Z kolei superplastyfikatory nowej generacji upłynniają zaczyn na skutek efektu sterycznego. Zasadniczą rolę odgrywa w tym przypadku ich przestrzenna struktura związana z obecnością łańcuchów bocznych, które uniemożliwiają zbliżenie się ziaren cementu do siebie.

Mechanizm działania superplastyfikatorów jest złożony. W zależności od rodzaju, domieszki te mogą wpływać na:

- powstawanie na ziarnach cementu i mikrowypełniaczy warstwy „smarnej” zmniejszającej tarcie wewnętrzne w zaczynie;
- otaczanie ziaren cementu ładunkami ujemnymi, powodującymi ich wzajemne odpychanie;
- zmniejszanie napięcia powierzchniowego wody w stosunku do cementu i mikrowypełniaczy;
- efekt steryczny – długie łańcuchy polimeru fizycznie uniemożliwiają ziarnom cementu zbliżanie się do siebie. Mechanizm ten powoduje, że domieszki nowej generacji działają „zapobiegawczo” – zamiast rozbijać już powstałe aglomeraty ziaren cementu, nie dopuszczają do ich utworzenia.

Efekty stosowania domieszek upłynniających do zaczynów uszczelniających są następujące [1, 4]:

- obniżenie współczynnika w/s (woda/spoiwo),
- zmniejszenie wodozadržności składników zaczynu uszczelniającego (ograniczenie tworzenia się rys skurczowych),
- poprawienie właściwości reologicznych oraz urabialności jak również ułatwienie zatłaczania zaczynu,
- podwyższenie wytrzymałości końcowej stwardniałego zaczynu w porównaniu do identycznego zaczynu bez dodatku plastyfikatorów,
- zwiększenie wytrzymałości wczesnej i szybszy przyrost wytrzymałości,
- poprawa trwałości pod względem zwiększenia odporności na korozję.

Efektywność działania superplastyfikatora zależy od wielu czynników takich, jak:

- rodzaj cementu (niektóre superplastyfikatory nie mogą być stosowane z cementami hutniczymi);
- uziarnienie dodatków mineralnych (zwłaszcza zawartości frakcji pylistych);
- rodzaj gipsu wprowadzonego do cementu jako regulatora czasu wiązania;
- konsystencja zaczynu;
- koncentracja domieszki upłynniającej;
- rodzaj i skład chemiczny domieszki;
- współczynnik wodno-spoiwowy;
- sposób i czas wprowadzenia domieszki do zaczynu.

4. BADANIA LABORATORYJNE

Badania laboratoryjne parametrów technologicznych zaczynów uszczelniających przeprowadza się w oparciu o następujące normy:

- PN-EN 197-1:2002. *Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.*
- PN-EN 196-1:1996. *Metody badania cementu. Oznaczanie wytrzymałości. Grudzień 1996.*
- PN-EN ISO 10426 -2. *Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 2: Badania cementów wiertniczych. 2003.*

Przeprowadzone badania laboratoryjne miały na celu udowodnienie następującej tezy: odpowiednio dobrana koncentracja plastyfikatora Arpoment P, wpływa korzystnie na parametry technologiczne świeżego i stwardniałego zaczynu uszczelniającego sporządzanego na osnowie cementu CEM II B/V32,5 R.

W przeprowadzanych badaniach zmiennymi były:

- współczynnik w/c,
- koncentracja upłynniacza o nazwie handlowej Arpoment P w zaczynie.

Współczynnik wodno-cementowy dla badanych zaczynów uszczelniających wynosił: 0,35; 0,4; 0,45; 0,5.

Arpoment P jest superplastyfikatorem naftalenowo-melaminowym odznaczający się dodatkowo działaniem przyspieszającym twardnienie zaczynu i łagodnie napowietrzającym zaczyn uszczelniający [10]. Koncentracja upłynniacza w zaczynie wynosiła 0,5; 1,0; 1,5 i 2,0% (wagowo w stosunku do masy suchego cementu).

Receptury badanych zaczynów uszczelniających oraz ich symbole zawiera tabela 2.

Tabela 2
Receptury badanych zaczynów uszczelniających

Lp.	Symbol zaczynu	Współczynnik wodno-cementowy [-]	Koncentracja dodatku [%]	Nazwa dodatku
1	1A	0,35	–	–
2	2A	0,40	–	–
3	3A	0,45	–	–
4	4A	0,50	–	–
5	1B	0,35	0,5	Arpoment P
6	1C	0,35	1,0	Arpoment P
7	1D	0,35	1,5	Arpoment P
8	1E	0,35	2,0	Arpoment P
9	2B	0,40	0,5	Arpoment P
10	2C	0,40	1,0	Arpoment P
11	2D	0,40	1,5	Arpoment P
12	2E	0,40	2,0	Arpoment P
13	3B	0,45	0,5	Arpoment P
14	3C	0,45	1,0	Arpoment P
15	3D	0,45	1,5	Arpoment P
16	3E	0,45	2,0	Arpoment P
17	4B	0,50	0,5	Arpoment P
18	4C	0,50	1,0	Arpoment P
19	4D	0,50	1,5	Arpoment P
20	4E	0,50	2,0	Arpoment P

Pierwsza cyfra symbolu (tab. 2) oznacza współczynnik wodno-cementowy danego zaczynu:

- odpowiada współczynnikowi $w/c = 0,35$,
- odpowiada współczynnikowi $w/c = 0,40$,
- odpowiada współczynnikowi $w/c = 0,45$,
- odpowiada współczynnikowi $w/c = 0,50$.

Litera oznacza koncentracje domieszki:

- A – oznacza recepturę bez domieszki
- B – oznacza recepturę z 0,5-procentową koncentracją domieszki,
- C – oznacza recepturę z 1,0-procentową koncentracją domieszki,
- D – oznacza recepturę z 1,5-procentową koncentracją domieszki,
- E – oznacza recepturę z 2,0-procentową koncentracją domieszki.

Wpływ badanego superplastyfikatora na czas wiązania zaczynów pokazuje tabela 3.

Tabela 3

Wyniki początkowych i końcowych czasów wiązania zaczynów uszczelniających

Lp.	Symbol zaczynu	Współczynnik wodno-cementowy [-]	Koncentracja domieszki [%]	Czas wiązania [godz.; min]	
				Początek wiązania	Koniec wiązania
1	1A	0,35	–	3;15	5;15
2	2A	0,40	–	2;20	4;00
3	3A	0,45	–	3;15	5;30
4	4A	0,50	–	3;30	5;50
5	1B	0,35	0,5	3;40	5;50
6	1C	0,35	1,0	6;00	7;20
7	1D	0,35	1,5	7;10	9;20
8	1E	0,35	2,0	8;40	10;50
9	2B	0,40	0,5	5;30	8;10
10	2C	0,40	1,0	7;00	9;20
11	2D	0,40	1,5	9;30	12;00
12	2E	0,40	2,0	11;10	13;40
13	3B	0,45	0,5	6;30	10;10
14	3C	0,45	1,0	8;30	11;20
15	3D	0,45	1,5	9;40	12;10
16	3E	0,45	2,0	10;00	12;00
17	4B	0,50	0,5	6;50	9;00
18	4C	0,50	1,0	10;00	13;00
19	4D	0,50	1,5	11;10	16;00
20	4E	0,50	2,0	12;30	15;50

W celu wyboru optymalnego modelu reologicznego dla konkretnego zaczynu uszczelniającego z dodatkiem badanej domieszki Arpoment P, otrzymane wyniki z pomiarów lepkościomierzem Chan 35 poddawano analizie najczęściej stosowanych w praktyce modeli reologicznych. Parametry reologiczne poszczególnych modeli obliczono, wykorzystując analizę regresji oraz stosując metodę najmniejszych kwadratów.

W Katedrze Wiertnictwa i Geoinżynierii na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH opracowano zasady wyznaczania parametrów reologicznych oraz metodykę doboru optymalnego modelu reologicznego cieczy wiertniczej. Został również opracowany program numeryczny Rheo Solution wspomagający proces doboru modelu reologicznego dla rzeczywistej cieczy wiertniczej w tym również różnego typu zaczynów uszczelniających [8, 9]. W tabelach 4–8 przedstawiono obliczone parametry reologiczne dla analizowanych modeli z zaznaczeniem modelu optymalnego dla każdej z receptur.

Tabela 4

Parametry reologiczne badanych zaczynów uszczelniających
określone dla różnych modeli reologicznych

Modele reologiczne	Parametry reologiczne	Symbole receptur zaczynu			
		1A	2A	3A	4A
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	1,9092	0,3004	0,1568	0,0869
	Współczynnik korelacji [–]	0,4751	0,8422	0,9245	0,8631
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	nm	nm	0,1400	0,0750
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	1,2165	0,2353	0,1323	0,0693
	Granica płynięcia [Pa]	45,1429	21,9654	15,8286	11,3309
	Współczynnik korelacji [–]	0,9539	0,9584	0,9840	0,9764
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	nm	nm	0,1400	0,0750
Model Ostwalda–de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	26,7233	7,5013	4,1773	3,5699
	Wykładnik potęgowy [–]	0,3717	0,4468	0,4894	0,4225
	Współczynnik korelacji [–]	0,9834	0,9908	0,9890	0,9886
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,6004	0,1513	0,0913	0,0433
	Granica płynięcia [Pa]	26,5477	10,5800	7,0906	5,8993
	Współczynnik korelacji [–]	0,9780	0,9784	0,9950	0,9931
Model Herschela–Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	12,0750	0,7580	6,3637	4,5855
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	16,3032	6,2876	1,3988	1,1786
	Wykładnik potęgowy [–]	0,4756	0,4853	0,6590	0,5919
	Współczynnik korelacji [–]	0,9881	0,9944	0,9984	0,9987

nm – nie mierzono

Tabela 5
 Parametry reologiczne badanych zacinów uszczelniających
 określone dla różnych modeli reologicznych

Modele reologiczne	Parametry reologiczne	Symbole receptur zacinu			
		1B	1C	1D	1E
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,9914	0,6867	0,4489	0,6328
	Współczynnik korelacji [-]	0,6423	0,9586	0,9977	0,9787
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	nm	nm	nm	nm
Model Binghama	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,6705	0,6032	0,4373	0,5871
	Granica płynięcia [Pa]	35,4543	9,2265	2,5191	5,0511
	Współczynnik korelacji [-]	0,9866	0,9826	0,9987	0,9863
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	nm	nm	nm	nm
Model Ostwalda–de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	22,7529	2,1136	0,8305	1,0183
	Wykładnik potęgowy [-]	0,3182	0,7870	0,8827	0,9277
	Współczynnik korelacji [-]	0,9257	0,9753	0,9988	0,9713
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,2849	0,5049	0,4185	0,5735
	Granica płynięcia [Pa]	23,8158	2,0405	0,1811	0,3873
	Współczynnik korelacji [-]	0,9801	0,9848	0,9991	0,9861
Model Herschela–Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	34,7430	2,1955	-0,3106	-5,1235
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	0,7919	2,3411	0,8067	3,4542
	Wykładnik potęgowy [-]	0,9678	0,7406	0,8951	0,6636
	Współczynnik korelacji [-]	0,9867	0,9867	0,9999	0,9981

nm – nie mierzono

Tabela 6

Parametry reologiczne badanych zaczynów uszczelniających
określone dla różnych modeli reologicznych

Modele reologiczne	Parametry reologiczne	Symbole receptur zaczynu			
		2B	2C	2D	2E
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,4164	0,3875	0,2527	0,2339
	Współczynnik korelacji [-]	0,9404	0,9525	0,9946	0,9975
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	nm	nm	nm	nm
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,3543	0,3394	0,2427	0,2284
	Granica płynięcia [Pa]	13,4791	10,4380	3,3848	1,8450
	Współczynnik korelacji [-]	0,9861	0,9820	0,9972	0,9984
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	nm	nm	nm	nm
Model Ostwalda–de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	3,4069	2,1633	0,7563	0,3688
	Wykładnik potęgowy [-]	0,6246	0,6995	0,8057	0,9278
	Współczynnik korelacji [-]	0,9972	0,9955	0,9967	0,9990
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,2664	0,2836	0,2243	0,2230
	Granica płynięcia [Pa]	4,6918	2,6651	0,4205	0,0923
	Współczynnik korelacji [-]	0,9939	0,9883	0,9982	0,9986
Model Herschela–Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	3,0755	-1,7459	-0,3098	-0,6187
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	2,5671	3,1875	0,6881	0,4994
	Wykładnik potęgowy [-]	0,6644	0,6218	0,8327	0,8742
	Współczynnik korelacji [-]	0,9987	0,9999	0,9998	0,9998

nm – nie mierzono

Tabela 7

Parametry reologiczne badanych zaczynów uszczelniających
określone dla różnych modeli reologicznych

Modele reologiczne	Parametry reologiczne	Symbole receptur zaczynu			
		3B	3C	3D	3E
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,1501	0,1338	0,1258	0,1054
	Współczynnik korelacji [-]	0,9312	0,9867	0,9939	0,9981
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	0,1350	0,1250	0,1200	0,1025
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,1287	0,1254	0,1206	0,1027
	Granica płynięcia [Pa]	13,8136	5,4144	3,3392	1,6952
	Współczynnik korelacji [-]	0,9785	0,9943	0,9970	0,9992
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	0,1350	0,1250	0,1200	0,1025
Model Ostwalda–de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	2,8559	0,9154	0,5447	0,4551
	Wykładnik potęgowy [-]	0,5488	0,6960	0,7633	0,7454
	Współczynnik korelacji [-]	0,9942	0,9929	0,9918	0,9663
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,0963	0,1092	0,1106	0,0936
	Granica płynięcia [Pa]	5,2555	1,1710	0,4873	0,2582
	Współczynnik korelacji [-]	0,9887	0,9972	0,9984	0,9998
Model Herschela–Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	3,1241	0,8856	0,3090	0,4926
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	1,7099	0,5391	0,3597	0,1804
	Wykładnik potęgowy [-]	0,6266	0,7833	0,8411	0,9180
	Współczynnik korelacji [-]	0,9958	0,9998	1,0000	0,9999

Tabela 8

Parametry reologiczne badanych zaczynów uszczelniających
określone dla różnych modeli reologicznych

Modele reologiczne	Parametry reologiczne	Symbole receptur zaczynu			
		4B	4C	4D	4E
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,1033	0,0568	0,0500	0,0348
	Współczynnik korelacji [-]	0,9601	0,9977	0,9912	0,9893
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	0,0950	0,0560	0,0485	0,0340
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	00905	0,0549	0,0473	0,0328
	Granica płynięcia [Pa]	8,2688	1,2509	1,6967	1,2871
	Współczynnik korelacji [-]	0,9947	0,9998	0,9964	0,9955
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	0,0950	0,0560	0,0485	0,0340
Model Ostwalda–de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	2,8330	0,4900	0,2779	0,2347
	Wykładnik potęgowy [-]	0,4625	0,6236	0,7305	0,6965
	Współczynnik korelacji [-]	0,9499	0,9241	0,9919	0,9852
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,0617	0,0451	0,0413	0,0279
	Granica płynięcia [Pa]	3,8321	0,3914	0,3566	0,3113
	Współczynnik korelacji [-]	0,9999	0,9987	0,9979	0,9969
Model Herschela–Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	5,0614	1,1683	0,8411	0,7877
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	0,3810	0,0594	0,1084	0,0670
	Wykładnik potęgowy [-]	0,7913	0,9885	0,8793	0,8962
	Współczynnik korelacji [-]	0,9998	0,9998	0,9979	0,9966

W tabelach 9 i 10 zamieszczono wyniki parametrów wytrzymałościowych stwardniałych zaczynów po 2 i 7 dniach ich utwardzania w środowisku wodnym w temperaturze 20°C.

Tabela 9

Wyniki wytrzymałości na zginanie stwardniałych zaczynów
po okresie utwardzania 2 i 7 dniach

Lp.	Symbol zaczynu	Współczynnik wodno-cementowy [-]	Koncentracja domieszki [%]	Wytrzymałość na zginanie [MPa]	
				2 dni	7 dni
1	1A	0,35	–	5,66	8,45
2	2A	0,40	–	3,81	6,40
3	3A	0,45	–	2,63	5,50
4	4A	0,50	–	3,24	4,74
5	1B	0,35	0,5	4,67	7,61
6	1C	0,35	1,0	4,00	8,65
7	1E	0,35	2,0	5,84	9,24
8	4B	0,50	0,5	2,93	5,11
9	4C	0,50	1,0	3,07	3,86
10	4E	0,50	2,0	3,09	4,17

Tabela 10

Wyniki wytrzymałości na ściskanie stwardniałych zaczynów
po okresie utwardzania 2 i 7 dniach

Lp.	Symbol zaczynu	Współczynnik wodno-cementowy [-]	Koncentracja domieszki [%]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	
				2 dni	7 dni
1	1A	0,35	–	22,29	40,41
2	2A	0,4	–	17,15	30,27
3	3A	0,45	–	13,75	23,19
4	4A	0,5	–	8,43	19,17
5	1B	0,35	0,5	28,75	40,97
6	1C	0,35	1	28,12	39,11
7	1E	0,35	2	24,09	36,60
8	4B	0,5	0,5	8,12	16,25
9	4C	0,5	1	8,26	15,55
10	4E	0,5	2	7,58	18,44

5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz analizy uzyskanych wyników można stwierdzić, że wraz ze wzrostem koncentracji superplastyfikatora (o nazwie handlowej Arpoment P) w zaczynie uszczelniającym sporządzanym na osnowie cementu portlandzko popiołowego CEM II/B-V 32,5R występuje:

- wydłużenie zarówno początku, jak i końca wiązania;
- istotne obniżenie lepkości plastycznej oraz pozornej;
- pod względem reologicznym badane zaczyny opisywane są modelem Herschela–Bulkeleya;
- skuteczność poprawy właściwości reologicznych wyraźnie jest większa dla zaczynów posiadających większą zawartość cementu w swym składzie (mniejsze w/c);
- obniżenie parametrów wytrzymałościowych stwardniałych zaczynów, zwłaszcza w początkowym okresie ich twardnienia charakteryzującymi się zwiększonymi współczynnikami w/c.

Dane zawarte w tabelach pozwalają na stwierdzenie, że dodatek badanego superplastyfikatora o koncentracji nie przekraczającej 2%, a zwłaszcza w zaczynach cementowych o współczynnikach wodno-cementowych (w/c) 0,4 i 0,5 modyfikuje w taki sposób parametry technologiczne zaczynu, w tym również właściwości reologiczne, że mogą być zastosowane do uszczelniania zarówno ośrodka gruntowego, jak i masywu skalnego metodami iniekcji otworowej. Wzrost współczynnika w/c powyżej 0,5 powoduje bardzo istotne wydłużenie czasu wiązania oraz gwałtowne obniżenie wytrzymałości mechanicznej stwardniałych zaczynów, a zwłaszcza w początkowym okresie ich twardnienia.

LITERATURA

- [1] Jasiczak J., Mikołajczak P.: *Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami. Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami*. Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1997
- [2] Jasiczak J.: *Technologia betonu II*. Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2003
- [3] Kumala B.: *Wpływ plastyfikatora Arpoment P na parametry technologiczne zaczynów uszczelniających sporządzonych na osnowie cementu CEM IIB/V 32,5R*. Kraków, Wydział WNiG AGH 2007 (praca dyplomowa magisterska)
- [4] Kucharska L.: *Tradycyjne i współczesne domieszki do betonu zmniejszające ilość wody zarobowej*. Cement Wapno Beton, 2/2000
- [5] Łukowski P.: *Domieszki do zapraw i betonów*. Kraków, Polski Cement Sp. z o.o. 1998
- [6] Neville A.M.: *Właściwości betonu*. Kraków, Polski Cement Sp. z o.o. 2000
- [7] Strzyżek S., Gonet A.: *Wymagania odnośnie zaczynów uszczelniających stosowanych w technologiach wiertniczych*. Sympozjum Naukowo-Techniczne, „Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynierskich oraz hydrotechnice”, Piła – Płotki, 2001

- [8] Wiśniowski R.: *Metodyka określania modelu reologicznego cieczy wiertniczej*. Wiertnictwo Nafta Gaz (rocznik AGH), 2001 R. 18/1, 2001
- [9] Wiśniowski R., Skrzypaszek K.: *Komputerowe wspomaganie wyznaczania modelu reologicznego cieczy – program Flow Fluid Coef*. Nowoczesne Techniki i Technologie Bezwykopowe, nr 2–3, Kraków, 2001
- [10] <http://www.war-remedium.pl>