

Stanisław Stryczek*, Andrzej Gonet*, Rafał Wiśniowski*

WPLYW TEMPERATURY NA WŁAŚCIWOŚCI TECHNOLOGICZNE ZACZYNÓW USZCZELNIAJĄCYCH STOSOWANYCH DO PRAC GEOINŻYNIERYJNYCH**

1. WSTĘP

Stosowane w pracach geoinżynierskich podczas uszczelniania i wzmocnienia gruntów i skał oraz do cementowania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych, zaczyny uszczelniające projektuje się między innymi ze względu na szeroki zakres temperatur panujących w górotworze (od poniżej zera w strefach wiecznej zmarzliny do 350°C w otworach geotermalnych). Dotyczy to także zakresu ciśnienia – od atmosferycznego w otworach płytkich aż do ciśnień rzędu 200 MPa. Niezależnie od tego, cementy muszą być odporne na silnie zmineralizowane płyny złożowe, jak również spełniać warunki uszczelniania skał o bardzo wysokim gradientcie ciśnienia złożowego [12, 13].

Zatem prawidłowy dobór zaczynu i jego parametrów technologicznych ma wpływ na pomyślność przeprowadzenia prac uszczelniających, uzyskanie zgodności zaczynu z otoczeniem, kontrolowany i ściśle określony czas wiązania, zapewnienie odpowiedniej mechanicznej wytrzymałości oraz długoletniej trwałości i odporności na korozję stwardniałych zaczynów. Spełnienie tych wszystkich wymagań może być zrealizowane tylko i wyłącznie przez stosowanie odpowiednich dodatków do cementu.

Jest to nie tylko kwestia wymagań, lecz także aspekt ekonomiczny przedsięwzięcia. Obniżenie kosztów inwestycji przy jednoczesnym zachowaniu parametrów technologicznych, a nierzadko nawet przy ich polepszeniu, jednoznacznie wskazuje na zasadność stosowania tychże składników receptury.

Zaczyny uszczelniające sporządzone na osnowie cementu portlandzkiego wykazują wiele wad: długi czas wiązania, nieodpowiednie właściwości reologiczne, małą odporność na czynniki korozyjne [2, 3].

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Pracę zrealizowano w Zakładzie Wiertnictwa i Geoinżynierii na Wydziale WNIG w ramach badań własnych 10.10.190.317

W związku z tym, w ostatnich latach prowadzone są intensywne badania nad dalszym rozwojem spoiw i zaczynów w celu uzyskania nowej generacji spoiw specjalnych zwanych geopolimerami.

Zaczyny na osnowie geopolimerów oparte są wyłącznie na składnikach pochodzenia nieorganicznego. Otrzymuje się je poprzez modyfikację składu, odpowiednio zestawionych i przygotowanych, zaczynów sporządzonych na osnowie bądź to wieloskładnikowych cementów powszechnego użytku, bądź mielonych granulowanych żużli wielkopieczowych z dodatkami o właściwościach pucolanowych [4, 5, 7, 11].

2. CEMENTY HUTNICZE

Cementy o tej nazwie powstają poprzez wspólny przemiał klinkieru portlandzkiego, granulowanego żużla wielkopieczowego oraz regulatora wiązania, czyli kamienia gipsowego. Granulowany żużel wielkopieczowy jest dodatkiem hydraulicznym o składzie jakościowo zbliżonym do klinkieru cementowego. Żużel ten stanowi odpad powstający przy produkcji surowki żelaza. Powstaje w wyniku gwałtownego schłodzenia płynnego żużla wytworzonego w procesie wytapiania rud żelaza w wielkim piecu. Powstający w końcowej fazie produkcji stop glinokrzemianowy jest wynikiem reakcji skały płonnej zawartej w rudzie oraz topników w postaci węglanu wapnia. Na każdą tonę surowki powstaje około 300 kg żużla. Podstawowymi składnikami chemicznymi żużla są tlenek wapnia, krzemionka i tlenek glinu, a więc te same tlenki, które wchodzi w skład cementu portlandzkiego, lecz nie w tych samych proporcjach [1, 5, 6, 11, 14].

Żużel ten jest wykorzystywany w przemyśle cementowym w różny sposób. Stosuje się go razem z wapieniem jako składnik nadmiaru surowcowego podczas produkcji klinkieru portlandzkiego metoda suchą. Wytworzony w taki sposób klinkier zostaje użyty razem z żużlem do produkcji cementu hutniczego. Ten sposób wykorzystanie żużel, który nie musi być w postaci zeszlonej, jest korzystny ekonomicznie, ponieważ wprowadzony zostaje składnik wapniowy nie w postaci węglanu tylko jako tlenku (CaO) i nie potrzebna jest energia na przeprowadzenie dekarbonatyzacji.

Kolejną korzystną cechą żużla jest to, że może on być wykorzystany samodzielnie jako materiał wiążący po zmieleniu do odpowiedniej powierzchni właściwej w obecności aktywatora alkalicznego, który pełni funkcję materiału wiążącego [6, 9].

Europejska norma EN 197-1:2000 dzieli cementy hutnicze na trzy rodzaje, w zależności od procentowej zawartości każdego ze składników (tab. 1).

Cement hutniczy jest produkowany przez wspólny przemiał klinkieru cementu portlandzkiego z suchym granulowanym żużlem wielkopieczowym (razem z gipsem) lub przez mieszanie na sucho cementu portlandzkiego i żużla. Obydwie metody stosowane są z powodzeniem, ale należy podkreślić, że żużel jest twardszy niż klinkier, co trzeba uwzględnić w procesie mielenia. Oddzielne mielenie żużla powoduje powstanie bardziej gładkiej tekstury powierzchni jego ziarn, co jest korzystne ze względu na urabialność [5, 6, 8]. Zaczyny z cementów hutniczych mają lepsze właściwości reologiczne, znacznie polepsza się pompowność.

Tabela 1
Podział cementów hutniczych [3]

Główne rodzaje	Nazwy wyrobów (rodzajów cementów powszechnego użytku)		Skład (udział w procentach masy ^a)		
			Składniki główne		Składniki drugorzędne
			Klinkier K	Żużel wielkopiecowy S	
CEM III	Cement hutniczy	CEMIII/A	35÷64	36÷65	0÷5
		CEMIII/B	20÷34	66÷80	0÷5
		CEMIII/C	5÷19	81÷95	0÷5

^a Wartości w tabeli odnosi się do sumy składników głównych i składników drugorzędnych

Zaczniny wykonane z cementów hutniczych charakteryzują się niskim ciepłem hydratacji [8, 9]. Jest ono prawie dwukrotnie mniejsze od ciepła hydratacji zaczynów wykonanych z cementów portlandzkich

Niskie ciepło twardnienia wpływa bardzo korzystnie na zmniejszenie skurczu, a tym samym na zwiększenie ilości zaczynu. W efekcie mikrostruktura zaczynu jest bardzo zwarta [8, 10].

W omawianym zaczynie cementowym występuje znacznie mniejsza ilość wodorotlenku wapniowego, najmniej odpornego na korozję chemiczną, z kolei zwiększa się udział fazy CSH o stosunku C/S poniżej 1. Ta zmiana składu fazowego prowadzi także do zmiany jego porowatości (przy stałym stosunku w/c). Maleje ilość składników krystalicznych, a rośnie żelowych. Efektem tego procesu jest zarastanie dużych porów kapilarnych i wzrost udziału porów żelowych [1, 8, 10, 11].

Dzięki zmianie struktury porów, maleje także przepuszczalność zaczynu. Wzrost udziału bardzo drobnych porów żelowych, kosztem większych i decydujących o przepuszczalności stwardniałego zaczynu porów kapilarnych, prowadzi do zwiększenia szczelności zaczynu, co bezpośrednio przenosi się na podwyższenie jego trwałości.

W wyniku zagęszczenia mikrostruktury uwodnionego zaczynu na bazie cementu hutniczego oraz ze względu na niższą zawartość wodorotlenku wapnia, wzrasta odporność na agresję siarczanową. Hooton i Emerry stwierdzili, że cement hutniczy wykazuje taką samą odporność siarczanową jak cement siarczanoodporny [1].

Cement hutniczy wykazuje także wysoką odporność na korozję chlorkową i siarczano-magnezową. W przypadku jonów chlorkowych najbardziej niekorzystnie na stwardniały zaczyn działa chlorek magnezu i wapnia. W przypadku zaczynów wykonanych z cementu hutniczego obserwuje się znacznie większą odporność chlorkową [2, 4, 6].

Zawartość granulowanego żużla w cemencie hutniczym wpływa na wydłużenie jego czasu wiązania, średnio o 30÷60 minut. Dotyczy to głównie temperatur poniżej 20°C, szczególnie nie zaleca się go stosować w temperaturach poniżej 5°C [3, 5, 6,]. W temperaturach bliskich 30°C nie stwierdza się istotnych różnic. Dłuższy czas wiązania cementów hutniczych można wykorzystać, gdy trzeba zatłaczać zaczyn na duże głębokości.

Zaczyny uszczelniające wykonane na osnowie cementów hutniczych mają małe przyrosty wytrzymałości w początkowym czasie wiązania. Ich wytrzymałości są mniejsze niż wytrzymałości zaczynów wykonanych z cementu portlandzkiego. Spadek wytrzymałości zależy od ilości żużla w cemencie, czyli od rodzaju cementu hutniczego. Różnice te są jednak tak niewielkie, że nie mają większego znaczenia, zwłaszcza, że wytrzymałości normowe (28 dni) są porównywalne lub wyższe w przypadku cementów hutniczych. Dużą zaletą omawianych cementów jest wysoki przyrost wytrzymałości w dłuższych czasach twardnienia (90 i więcej dni). Ta wyższa wytrzymałość związana jest z niższą porowatością zaczynu, wyższą zawartością porów żelowych oraz wyższą odpornością na działanie czynników agresywnych [3, 4, 6].

3. BADANIA LABORATORYJNE

3.1. Metodyka badań laboratoryjnych

Badania laboratoryjne związane z pomiarem parametrów technologicznych, świeżych i stwardniałych zaczynów uszczelniających przeprowadza się na podstawie następujących norm:

- Polska Norma PN-EN 196-1. *Metody badania cementu. Oznaczenie wytrzymałości*. Grudzień 1990.
- Polska Norma PN-EN 196-3. *Metody badania cementu. Oznaczenie czasów wiązania i stałości objętości*. Grudzień 1996.
- Polska Norma PN-B-19701. *Cement. Skład, wymagania i ocena zgodności*.
- Norma Amerykańskiego Instytutu Naftowego (API). *Specification for Materials and Testing for Well Cements*. API Specifications 10 (SPEC 10) Fifth Edition, July 1, 1990.

Badania laboratoryjne związane z określeniem parametrów technologicznych świeżych i stwardniałych zaczynów uszczelniających obejmują pomiary:

- dla świeżych zaczynów uszczelniających:
 - gęstości (masy) za pomocą wagi ramiennej typu Baroid,
 - rozlewności za pomocą stożka ściętego (AzNII),
 - lepkości umownej (względnej) za pomocą kubka Forda nr 4,
 - sedymentacji (odstoju) za pomocą cylindra pomiarowego,
 - filtracji za pomocą prasy filtracyjnej typu Baroid,
 - czasu wiązania za pomocą aparatu Vicata,
 - właściwości reologicznych za pomocą lepkościomierza obrotowego o współosiowych cylindrach typu Chan 35 API Viscometer o dwunastu prędkościach obrotowych oraz płynnej regulacji obrotów;
- dla stwardniałych zaczynów uszczelniających:
 - wytrzymałości na zginanie za pomocą aparatu Michealisa,
 - wytrzymałości na ściskanie za pomocą prasy hydraulicznej.

Przeprowadzone badania laboratoryjne miały na celu zbadania przydatności cementu hutniczego CEM III/B i CEM III/C do zastosowania go jako spoiwa w zaczynach uszczelniających w pracach geoinżynierskich oraz w wiertnictwie.

W przeprowadzanych badaniach zmiennymi były:

- współczynnik w/c ,
- temperatura.

3.2. Przygotowanie zaczynów uszczelniających do badań laboratoryjnych

Współczynnik wodno-cementowy dla badanych zaczynów uszczelniających wynosił: 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2. Zaczyny sporządzano w trzech temperaturach: 20°C (293 K), 10°C (283 K) i 5°C (278 K). Składniki służące do sporządzenia zaczynów miały temperaturę odpowiednią do serii badań. Cement przeznaczony do sporządzenia zaczynów był przesiewany przez trzy sита z drutu, o następujących wymiarach boku oczka kwadratowego: 1,0; 0,20; 0,08 mm. Do sporządzenia zaczynów stosowano tylko przesiany cement. Spiwiwa hydrauliczne były przechowywane zgodnie z wymaganiami normowymi i zaleceniami producenta. Odmierzanie objętości cieczy zarobowej wynikające z założonego współczynnika w/c wlewano do naczynia plastikowego, a następnie uruchamiano elektryczne mieszadło szybkoobrotowe 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). Czas mieszania tak sporządzonego zaczynu wynosił około 3 minuty, zaś liczba obrotów mieszadła wynosiła 90 obr./s. Tak przygotowany zaczyn poddawano badaniom w ustalonej kolejności i w jak najkrótszym czasie.

4. ANALIZA WYNIKÓW Z BADAŃ LABORATORYJNYCH

W tabelach 2–4 przedstawiono wyniki badań parametrów technologicznych świeżych zaczynów sporządzanych na osnowie cementów hutniczych CEM III/B 32,5 i CEM III/C 32,5 dla różnych współczynników wodno-cementowych w zakresie temperatur 5, 10 i 20°C.

Wzrost współczynnika w/c niezależnie od rodzaju cementy powoduje:

- zmniejszenie gęstości,
- zwiększenie odstoju,
- zwiększenie filtracji,
- zmniejszenie lepkości względnej oraz pozornej,
- zwiększenie rozlewności,
- wydłużenie czasu wiązania (tab. 11).

Wzrost temperatury zaczynu wpływa na zmianę parametrów technologicznych w zakresie:

- wzrostu odstoju,
- zmniejszenia lepkości względnej i pozornej,
- skrócenia czasu wiązania.

Parametry zaczynów sporządzonych na osnowie cementu CEM III/C w porównaniu z cementem CEM III/B charakteryzują się:

- mniejszą gęstością,
- większym odstojem i filtracją,
- mniejszą lepkością względną i pozorną,
- wydłużeniem czasu wiązania (tab. 11).

Tabela 2

Parametry technologiczne zaczynów uszczelniających sporządzonych na osnowie cementu CEM III/B i CEM III/C, określone laboratoryjnie w temperaturze 5°C

Lp.	Rodzaj cementu	Współczynnik wodno-cementowy	Gęstość	Rozlewność wg stożka AzN II	Lepkość względna wg kubka Forda nr 4	Odstój	Filtracja właściwa $\Delta P = 0,7$ MPa
		[-]	[kg/m ³]	[mm]	[s]	[%]	[cm ³ /s]
1	CEM III/B	0,4	1900	nm	nm	brak	30/9
2		0,5	1800	150	nm	brak	66/13
3		0,6	1730	250	13	0,4	78/14
4		0,8	1630	powyżej 260	11	4	95/17
5		1,0	1500	powyżej 260	13	12	130/21
6		1,2	1440	powyżej 260	9	16	145/20
7	CEM III/C	0,4	1900	100	nm	0	45/12
8		0,5	1790	180	29	0	63/13
9		0,6	1700	255	14	2,4	80/16
10		0,8	1580	powyżej 260	11	11,6	100/18
11		1,0	1500	powyżej 260	10	24,4	133/19
12		1,2	1430	powyżej 260	10	32,6	150/21

nm – parametr niemierzalny ze względu na dużą lepkość zaczynu

Tabela 3

Parametry technologiczne zaczynów uszczelniających sporządzonych na osnowie cementu CEM III/B i CEM III/C, określone laboratoryjnie w temperaturze 10°C

Lp.	Rodzaj cementu	Współczynnik wodno-cementowy	Gęstość	Rozlewność wg stożka AzN II	Lepkość względna wg kubka Forda nr 4	Odstój	Filtracja właściwa $\Delta P = 0,7$ MPa
		[-]	[kg/m ³]	[mm]	[s]	[%]	[cm ³ /s]
1	CEM III/B	0,4	1910	nm	nm	brak	32/7
2		0,5	1810	160	42	brak	56/9
3		0,6	1720	240	13	0,4	74/12
4		0,8	1600	powyżej 260	11	6	100/12
5		1,0	1500	powyżej 260	13	12	115/15
6		1,2	1450	powyżej 260	9	17	140/18
7	CEM III/C	0,4	1910	110	nm	0	49/10
8		0,5	1790	185	26	0	74/14
9		0,6	1690	255	13	1,6	88/17
10		0,8	1570	powyżej 260	12	11,4	108/17
11		1,0	1500	powyżej 260	11	23,8	155/27
12		1,2	1400	powyżej 260	10	31	155/18

nm – parametr niemierzalny ze względu na dużą lepkość zaczynu

Tabela 4

Parametry technologiczne zaczynów uszczelniających sporządzonych na osnowie cementu CEM III/B i CEM III/C, określone laboratoryjnie w temperaturze 20°C

Lp.	Rodzaj cementu	Współczynnik wodno-cementowy	Gęstość	Rozlewność wg stożka AzN II	Lepkość względna wg kubka Forda nr 4	Odstój	Filtracja właściwa $\Delta P = 0,7$ MPa
		[-]	[kg/m ³]	[mm]	[s]	[%]	[cm ³ /s]
1	CEM III/B	0,4	1940	nm	nm	brak	47/8
2		0,5	1800	170	27,3	brak	58/9
3		0,6	1730	210	19,9	brak	76/11
4		0,8	1600	powyżej 260	10	5	94/11
5		1,0	1490	powyżej 260	8,5	17	123/14
6		1,2	1420	powyżej 260	7,5	26	135/16
7	CEM III/C	0,4	1900	100	nm	0	45/12
8		0,5	1790	180	29	0	63/13
9		0,6	1700	225	14	2,4	80/16
10		0,8	1580	powyżej 260	11	11,6	100/18
11		1,0	1500	powyżej 260	10	24,4	133/19
12		1,2	1430	powyżej 260	10	32,6	150/21

nm – parametr niemierzalny ze względu na dużą lepkość zaczynu

W tabelach 5–10 przedstawiono obliczone parametry reologiczne zaczynów cementowych na dwóch rodzajach cementu hutniczego o różnych wartościach współczynnika wodno-cementowego (w/c [0,35÷1,20]), a w tabeli 11 – czas wiązania zaczynów w funkcji w/c .

Parametry reologiczne obliczono dla następujących modeli:

- Newtona,
- Bingham’a,
- Cassona,
- Herschela–Bulkleya.

Za najlepszy model reologiczny dla każdego z analizowanych zaczynów uszczelniających przyjmowano taki, który charakteryzował się największą wartością współczynnika korelacji (wyróżnione pogrubioną czcionką wartości w tabelach). Zaczyny przy różnych współczynnikach wodno-cementowych pod względem reologicznym charakteryzowały się różnymi modelami. Dla zaczynów sporządzonych z cementu CEM III/B parametry reologiczne zależne są przede wszystkim od w/c , natomiast temperatura nie wpływa w sposób istotny na rodzaj modelu reologicznego i tak dla $w/c = 0,4\div 0,5$ zaczyny mogą być opisywane modelem Ostwalda de Waele, w zakresie $w/c = 0,6$ – modelami Cassona lub Herschela–Bulkleya natomiast dla $w/c = 0,8\div 1,2$ modelem Bingham’a. Zaczyny sporządzone na osnowie cementu CEM III/C w 90% opisywane są pod względem reologicznym modelem Cassona w zakresie badanych temperatur.

Tabela 5

Parametry reologiczne zaczynów uszczelniających sporządzonych na cemencie CEM III/B (5°C)

Parametry reologiczne		Współczynnik w/c					
		0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,2491	0,2136	0,0528	0,0207	0,123	0,0086
	Współczynnik korelacji [-]	0,8743	0,8756	0,9066	0,9211	0,7234	0,9047
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,1915	0,1813	0,0433	0,0171	0,0090	0,0071
	Granica płynięcia [Pa]	37,2103	20,8668	6,1647	2,2999	2,1383	0,9993
	Współczynnik korelacji [-]	0,8475	0,9274	0,9927	0,9978	0,9902	0,9884
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	6,3362	3,5726	2,5217	1,1259	1,5620	0,3868
	Wykładnik potęgowy [-]	0,5233	0,5712	0,3798	0,3451	0,2001	0,3930
	Współczynnik korelacji [-]	0,9430	0,9733	0,9456	0,8991	0,7578	0,9388
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,1540	0,1484	0,0253	0,0095	0,0032	0,0041
	Granica płynięcia [Pa]	13,3762	6,4498	3,5056	1,3973	1,6988	0,5756
	Współczynnik korelacji [-]	0,8757	0,9420	0,9997	0,9972	0,9530	0,9906
Model Herschela-Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	26,7381	11,7464	1,4116	0,7494	0,0130	1,1534
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	1,0239	1,0108	0,9934	0,9872	0,9808	0,9895
	Wykładnik potęgowy [-]	0,7647	0,7546	0,5455	0,4117	0,3140	0,2939
	Współczynnik korelacji [-]	0,9017	0,9593	0,9910	0,9600	0,8640	0,9362
Lepkość pozorna przy 1022,04 [s ⁻¹] [Pa·s]		nm	nm	0,0475	0,0190	0,0115	0,0080

nm – parametr niemierzalny ze względu na dużą lepkość zaczynu

Tabela 6

Parametry reologiczne zaczynów uszczelniających sporządzonych na cemencie CEM III/B (10°C)

Parametry reologiczne		Współczynnik w/c					
		0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,2528	0,1425	0,0519	0,0187	0,0107	0,0087
	Współczynnik korelacji [-]	0,6071	0,9106	0,9097	0,8328	0,8760	0,8717
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,1847	0,1196	0,0426	0,0144	0,0086	0,0069
	Granica płynięcia [Pa]	43,9785	14,8240	6,0069	2,7747	1,4023	1,1588
	Współczynnik korelacji [-]	0,8293	0,9740	0,9945	0,9990	0,9913	0,9926
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	9,7571	3,9813	2,5503	1,6534	0,6580	0,5791
	Wykładnik potęgowy [-]	0,4535	0,4785	0,3732	0,2669	0,3375	0,3193
	Współczynnik korelacji [-]	0,9487	0,9882	0,9359	0,8587	0,9132	0,9032
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,1364	0,0847	0,0243	0,0065	0,0044	0,0036
	Granica płynięcia [Pa]	18,7933	6,3676	3,5100	1,9557	0,8966	0,7394
	Współczynnik korelacji [-]	0,8693	0,9888	0,9984	0,9894	0,9893	0,9932
Model Herschela–Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	33,3594	7,2299	1,3584	0,0104	0,8875	0,9593
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	1,0264	1,0035	0,9923	0,9851	0,9884	0,9883
	Wykładnik potęgowy [-]	0,7602	0,6937	0,5423	0,3855	0,3173	0,2902
	Współczynnik korelacji [-]	0,8885	0,9967	0,9857	0,9410	0,9345	0,9335
Lepkość pozorna przy 1022,04 [s ⁻¹] [Pa·s]		nm	0,1225	0,0475	0,0170	0,0100	0,0080

nm – parametr niemierzalny ze względu na dużą lepkość zaczynu

Tabela 7

Parametry reologiczne zaczynów uszczelniających sporządzonych na cemencie CEM III/B (20°C)

Parametry reologiczne		Współczynnik w/c					
		0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,2487	01345	0,0526	0,0246	0,0120	0,0086
	Współczynnik korelacji [-]	0,6949	0,9057	0,7896	0,8313	0,7204	0,8905
Model Binghama	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,1896	0,1125	0,0400	0,0190	0,0087	0,0069
	Granica płynięcia [Pa]	38,2054	14,1913	8,1059	3,6523	2,0976	1,0797
	Współczynnik korelacji [-]	0,8506	0,9711	0,9691	0,9961	0,9926	0,9958
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	7,4288	3,4574	2,7686	1,9101	1,4746	0,5848
	Wykładnik potęgowy [-]	0,4943	0,4979	0,3870	0,2976	0,2084	0,3083
	Współczynnik korelacji [-]	0,9505	0,9960	0,9892	0,9083	0,7823	0,8740
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,1463	0,0813	0,0232	0,0093	0,0032	0,0035
	Granica płynięcia [Pa]	14,8553	5,8928	4,5891	2,4355	1,6416	0,7149
	Współczynnik korelacji [-]	0,8825	0,9865	0,9897	0,9973	0,9616	0,9888
Model Herschela–Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	27,8160	6,6872	3,2031	0,4207	0,0413	0,9856
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	1,0232	1,0042	0,9999	0,9888	0,9821	0,9867
	Wykładnik potęgowy [-]	0,7633	0,6853	0,5376	0,4270	0,3121	0,2869
	Współczynnik korelacji [-]	0,9041	0,9969	0,9964	0,9689	0,8772	0,9148
Lepkość pozorna przy 1022,04 [s ⁻¹] [Pa·s]		nm	0,1150	0,0450	0,0220	0,0110	0,0080

nm – parametr niemierzalny ze względu na dużą lepkość zaczynu

Tabela 8

Parametry reologiczne zaczynów uszczelniających sporządzonych na cemencie CEM III/C (5°C)

Parametry reologiczne		Współczynnik w/c					
		0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,2544	0,1382	0,0479	0,0160	0,0100	0,0078
	Współczynnik korelacji [-]	0,5767	0,9518	0,9373	0,9527	0,9433	0,9091
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,1840	0,1202	0,0406	0,0138	0,0086	0,0066
	Granica płynięcia [Pa]	45,4839	11,6364	4,7638	1,4444	0,8827	0,7968
	Współczynnik korelacji [-]	0,8160	0,9906	0,9951	0,9988	0,9866	0,9688
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	8,0775	3,0188	1,8455	0,6870	0,2724	0,2597
	Wykładnik potęgowy [-]	0,4976	0,5160	0,4113	0,3774	0,4721	0,4388
	Współczynnik korelacji [-]	0,9241	0,9820	0,9427	0,8913	0,9520	0,9311
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,1427	0,0852	0,0250	0,0081	0,0057	0,0042
	Granica płynięcia [Pa]	18,2392	4,9610	2,5650	0,8336	0,4237	0,3980
	Współczynnik korelacji [-]	0,8522	0,9975	0,9993	0,9957	0,9896	0,9731
Model Herschela–Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	34,6738	4,4695	0,2115	-1,2927	-1,4421	-1,3165
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	1,0288	0,9985	0,9919	0,9858	0,9894	0,9906
	Wykładnik potęgowy [-]	0,7600	0,6928	0,5355	0,3801	0,3193	0,2855
	Współczynnik korelacji [-]	0,8786	0,9973	0,9859	0,9453	0,9411	0,9243
Lepkość pozorna przy 1022,04 [s ⁻¹] [Pa·s]		nm	nm	0,0440	0,0150	0,0095	0,0075

nm – parametr niemierzalny ze względu na dużą lepkość zaczynu

Tabela 9

Parametry reologiczne zaczynów uszczelniających sporządzonych na cemencie CEM III/C (10°C)

Parametry reologiczne		Współczynnik w/c					
		0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,2460	0,1153	0,0389	0,0172	0,0107	0,0074
	Współczynnik korelacji [-]	0,7567	0,9404	0,9022	0,8917	0,9124	0,9497
Model Binghama	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,1959	0,0986	0,0317	0,0139	0,0088	0,0789
	Granica płynięcia [Pa]	32,3708	10,7787	4,6455	2,1349	1,2305	-2,7742
	Współczynnik korelacji [-]	0,8587	0,9901	0,9935	0,9922	0,9954	0,9546
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	4,9242	3,1089	1,9436	0,9652	0,5823	0,2593
	Wykładnik potęgowy [-]	0,5586	0,4816	0,3729	0,3518	0,3498	0,6416
	Współczynnik korelacji [-]	0,9403	0,9756	0,9409	0,9188	0,9063	0,5855
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,1635	0,0663	0,0181	0,0074	0,0048	0,0614
	Granica płynięcia [Pa]	10,3739	5,0487	2,7190	1,3270	0,7555	0,0157
	Współczynnik korelacji [-]	0,8809	0,9970	0,9984	0,9913	0,9938	0,9346
Model Herschela-Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	22,0727	4,1171	0,5408	-0,6662	-1,0749	-7,7822
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	1,0214	0,9975	0,9916	0,9884	0,9875	0,9791
	Wykładnik potęgowy [-]	0,7675	0,6641	0,5006	0,3832	0,3205	0,6254
	Współczynnik korelacji [-]	0,9082	0,9951	0,9827	0,9509	0,9364	0,9003
Lepkość pozorna przy 1022,04 [s ⁻¹] [Pa·s]		0,1750	0,1065	0,0355	0,0160	0,0100	0,0800

nm – parametr niemierzalny ze względu na dużą lepkość zaczynu

Tabela 10

Parametry reologiczne zaczynów uszczelniających sporządzonych na cemencie CEM III/C (20°C)

Parametry reologiczne		Współczynnik w/c					
		0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,2394	0,0863	0,0385	0,0152	0,0104	0,0083
	Współczynnik korelacji [-]	0,7968	0,8784	0,8583	0,8714	0,8828	0,8150
Model Binghama	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,1903	0,0695	0,0304	0,0121	0,0083	0,0064
	Granica płynięcia [Pa]	31,7238	10,8787	5,2901	2,0189	1,3242	1,2210
	Współczynnik korelacji [-]	0,9066	0,9825	0,9903	0,9925	0,9919	0,9741
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	6,7491	3,6350	2,2781	0,9229	0,6139	0,4773
	Wykładnik potęgowy [-]	0,4944	0,4147	0,3509	0,3398	0,3409	0,3621
	Współczynnik korelacji [-]	0,9798	0,9759	0,9437	0,9337	0,9161	0,9558
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,1437	0,0421	0,0162	0,0066	0,0044	0,0035
	Granica płynięcia [Pa]	12,4639	5,8680	3,2675	1,2341	0,8230	0,7330
	Współczynnik korelacji [-]	0,9324	0,9943	0,9957	0,9994	0,9928	0,9853
Model Herschela–Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	21,9943	4,9257	1,2494	-0,6882	-0,9525	-0,9178
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	1,0162	0,9984	0,9923	0,9895	0,9885	0,9922
	Wykładnik potęgowy [-]	0,7625	0,6144	0,4944	0,3660	0,3139	0,2842
	Współczynnik korelacji [-]	0,9484	0,9938	0,9807	0,9670	0,9399	0,9523
Lepkość pozorna przy 1022,04 [s ⁻¹] [Pa·s]		0,1795	0,0775	0,0350	0,0135	0,0095	0,0075

Tabela 11Czas wiązania zaczynów w funkcji w/c w różnych temperaturach

Rodzaj cementu	Współczynnik w/c	Czas wiązania [h]					
		początek	koniec	początek	koniec	początek	koniec
		5°C		10°C		20°C	
CEM III/B	0,4	6	9	5	7,5	4,4	6,2
	0,5	8	13	7,6	9,7	6	8,7
	0,6	10,5	14,5	9,3	12,3	7	10,2
	0,8	14,5	20,5	13	17	8,7	14,3
	1,0	18	34	16	28	14	20,7
	1,2	24	42	21	32	17,3	23
CEM III/C	0,4	5 h 42 min	8 h 42 min	5 h 12 min	8 h 00 min	4 h 48 min	7 h 12 min
	0,5	10 h 42 min	15 h 42 min	16 h 36 min	14 h 36 min	7 h 12 min	13 h 00 min
	0,6	16 h 36 min	24 h 06 min	14 h 36 min	21 h 06 min	11 h 06 min	16 h 48 min
	0,8	18 h 30 min	32 h 30 min	16 h 48 min	27 h 12 min	15 h 30 min	24 h 48 min
	1,0	21 h 30 min	38 h 48 min	19 h 48 min	35 h 36 min	18 h 30 min	30 h 24 min
	1,2	25 h 30 min	48 h 00 min	21 h 42 min	43 h 48 min	20 h 48 min	36 h 18 min

Biorąc za kryterium rodzaj zastosowanego cementu, można stwierdzić, że stwardniałe zaczyny sporządzone z cementu CEM III/B w badanym okresie dojrzewania mają lepsze parametry wytrzymałości mechanicznej w porównaniu z cementem CEM III/C (tab. 12). Wzrost współczynnika w/c powoduje obniżenie tych parametrów, zaś wzrost temperatury polepsza parametry wytrzymałościowe stwardniałych zaczynów dla każdego z badanych cementów.

Tabela 12

Wytrzymałość mechaniczna na zginanie i ściskanie stwardniałego zaczynu uszczelniającego

Lp.	Rodzaj cementu	Współczynnik wodno-cementowy [-]	Temperatura [°C]	Wytrzymałość na zginanie [MPa]								Wytrzymałość na ściskanie [MPa]							
				Czas utwardzania [dni]								Czas utwardzania [dni]							
				1	2	7	14	21	28	1	2	7	14	21	28				
1	CEM III/B	0,5	5	-	-	2,08	3,03	3,20	4,18	-	-	1,32	3,75	6,67	10,2	13,6			
2				-	-	2,45	3,87	4,16	4,69	-	-	1,74	5,56	9,24	11,7	14,5			
3				-	1,69	3,92	5,60	6,65	6,93	1,04	3,61	10,9	18,8	25,0	31,3				
4				-	-	-	-	-	1,31	-	-	-	1,67	2,92	3,54				
5				-	-	-	-	1,37	1,75	-	-	-	2,50	3,54	4,86				
6				-	-	-	1,87	2,90	3,23	-	-	-	2,78	5,49	7,92	10,0			
7	CEM III/C	0,5	5	-	-	-	1,9	3,04	3,20	-	-	-	1,88	3,65	6,67	7,92			
8				-	-	1,90	2,19	3,19	3,65	-	-	3,47	4,86	8,13	9,79				
9				-	-	2,22	3,21	4,15	4,61	-	-	3,85	7,88	9,79	16,1				
10				-	-	-	-	-	1,36	-	-	-	-	2,36	2,36				
11				-	-	-	-	-	1,56	-	-	-	-	1,88	2,95	3,13			
12				-	-	-	-	1,21	2,39	-	-	-	-	2,36	2,95	2,95			

LITERATURA

- [1] Artym M.: *Właściwości technologiczne świeżych i stwardniałych zaczynów sporządzonych na cemencie hutniczym CEM III/C*. Kraków, AGH WWiG 2004
- [2] Giergiec Z.: *Dobór cementu do określonych zastosowań w budownictwie i robotach inżynierskich*. Materiały Sympozjum Naukowo-Technicznego „Cementy w budownictwie, robotach wiertniczo-inżynierskich oraz w hydrotechnice”, Piła, 23 maja 2001
- [3] Giergiec Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J.: *Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji*. Opole, Górażdże Cement 2002
- [4] Kurdowski W.: *Chemia cementu*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN 1991
- [5] Kurdowski W.: *Chemia materiałów budowlanych*. Kraków, AGH 2000
- [6] Małolepszy J.: *Cement hutniczy CEM III/A 32,5 NA składnikiem betonu hydrotechnicznego i betonu w budowie oczyszczalni ścieków*. Materiały Sympozjum Naukowo-Technicznego „Cementy w budownictwie, robotach wiertniczo-inżynierskich oraz w hydrotechnice”, Piła, 23 maja 2001
- [7] Małolepszy J., Deja J., Brylicki W., Gawlicki M.: *Technologia betonu. Metody badań*. Skrypty Uczelniane AGH, nr 1447, Kraków 1995
- [8] Małolepszy J.: *Hydratacja i własności spoiwa żuźlowo-alkalicznego*. Zeszyty Naukowe AGH, nr 53, Kraków, Wydawnictwa AGH 1989
- [9] Małolepszy J.: *Technologia i własności spoiwa z granulowanego żuźla wielkopiecowego*. 1979 (praca doktorska)
- [10] Neville A.M.: *Właściwości betonu*. Kraków, Polski Cement 2000
- [11] Pamuła T.: *Właściwości technologiczne świeżych i stwardniałych zaczynów sporządzonych na cemencie hutniczym CEM III/B*. Kraków, AGH WWiG 2004
- [12] Rączkowski J., Stryczek S., Fugiel K., Kraj Ł., Wilk S.: *Zaczyny do uszczelniania w otworach wiertniczych*. Skrypty Uczelniane AGH, nr 612, Kraków 1978
- [13] Stryczek S., Gonet A.: *Geoinżynieria*. Studia, Rozprawy, Monografie. Kraków, Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN nr 71, 2000
- [14] Tarczyński K., Brydniek B.: *Własności granulowanych żuźli wielkopiecowych Huty Lenina i hut Bierut i Katowice oraz wpływ ich dodatku na własności cementu hutniczego*. Cement Wapno Gips, 11–12, 1982