

---

**PRACE**

**Instytutu Ceramiki  
i Materiałów Budowlanych**

---

***Scientific Works***  
of Institute of Ceramics  
and Building Materials

---

**Nr 11**

ISSN 1899-3230

**Rok V**

**Warszawa–Opole 2012**

---

*JERZY WITEK\**  
*HENRYK MRÓZ\*\**  
*JÓZEF BARAŃSKI\*\*\**  
*JERZY BRACH\*\*\*\**

## Utylizacja odpadów zawierających azbest metodą topienia w piecu łukowo-oporowym

**Słowa kluczowe:** azbest, utylizacja azbestu, topienie, spoiwa hydrauliczne.

Przeprowadzono próby topienia odpadów zawierających azbest w elektrycznym piecu łukowo-oporowym. Do prób tych wytypowano eternit, stanowiący ponad 90% odpadów zawierających azbest. Prowadzono je w laboratoryjnym, a następnie w przemysłowym piecu łukowo-oporowym. Udowodniono, że można w ten sposób całkowicie „zniszczyć” strukturę włóknistą azbestu zawartego w eternicie. Wykazano również, że korygując odpowiednio skład chemiczny eternitu oraz dobierając odpowiednie warunki chłodzenia powstałego stopu, można uzyskać materiał, w którego składzie fazowym dominują krzemiany wapniowe  $C_2S$  i  $C_3S$ . Cement wytworzony z tego materiału charakteryzował się wysoką wytrzymałością na zginanie i ściskanie (7,4 MPa–51,4 MPa), co pozwala zaliczyć go do wysokojakościowej klasy CEM I 42.5 R.

### 1. Wprowadzenie

Problemy szkodliwości oraz unieszkodliwiania azbestu są powszechnie znane i dotyczą praktycznie całego świata. W Polsce skala tego problemu ma szczególnie duży wymiar. Na terenie Polski znajduje się obecnie ok.  $15 \times 10^9$  kg wyrobów zawierających azbest [1]. W roku 1997 Sejm Rzeczypospolitej przyjął rezolucję w sprawie wycofania azbestu z gospodarki oraz uchwalił ustawę

---

\* Mgr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Materiałów Ogniotrwałych w Gliwicach.

\*\* Mgr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie.

\*\*\* Mgr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Materiałów Ogniotrwałych w Gliwicach.

\*\*\*\* Mgr inż., Futurum Spółka z o.o. w Częstochowie.

o zakazie stosowania wyrobów zawierających azbest. W rezultacie od 2003 r. rozpoczęła się realizacja przyjętego przez Radę Ministrów programu usuwania azbestu i wyrobów zawierających azbest z terytorium Polski. Program ten zakłada usunięcie tych wyrobów do końca 2032 r. i uznano go za jeden z priorytetowych dla ochrony zdrowia i środowiska.

Utylizacja azbestu była i jest przedmiotem licznych badań prowadzonych przez różne ośrodki naukowo-badawcze zarówno w kraju, jak i za granicą. Opatentowanych jest ok. 80 metod unieszkodliwiania azbestu [2]. Zdecydowana większość z nich dotyczy metod chemicznego niszczenia struktury włóknistej azbestu lub immobilizacji azbestu w różnego rodzaju materiałach. Badania, których wyniki przedstawiono poniżej, dotyczyły termicznej metody unieszkodliwiania azbestu. Metody termiczne były już przedmiotem badań. We Francji opracowano i wdrożono metodę unieszkodliwiania azbestu w strumieniu plazmy [3]. We Włoszech prowadzono prace nad destrukcją termiczną azbestu w warunkach konwencjonalnych i wykorzystaniem produktów takiej destrukcji jako surowców w produkcji szkła i ceramiki [4]. Podobne badania prowadzono również w Polsce. Dotyczyły one wykorzystania w ceramice produktów uzyskanych w procesie niskotemperaturowego prażenia, a następnie mielenia azbestu [5–6]. W Polsce opracowano także metodę i urządzenie do termicznego unieszkodliwiania azbestu za pomocą mikrofal, gdzie uzyskane produkty polecane są jako kruszywo budowlane [7].

Celem niniejszej pracy było przeprowadzenie prób topienia odpadów zawierających azbest w elektrycznym piecu łukowo-oporowym oraz ocena przydatności uzyskanych w ten sposób materiałów do wytwarzania spoiw hydraulicznych.

## 2. Właściwości fizykochemiczne eternitu

Do przeprowadzenia prób utylizacji azbestu metodą topienia w elektrycznym piecu łukowo-oporowym wytypowano eternit, który stanowi ponad 90% wyrobów azbestowych znajdujących się obecnie na obszarze Polski. Właściwości fizykochemiczne eternitu poddawanego próbom topienia przedstawiono w tabeli 1. Zarówno skład chemiczny, jak i fazowy odzwierciedlają skład surowcowy stosowany przy produkcji wyrobów eternitowych, gdzie głównymi składnikami poza azbestem były piasek, cement portlandzki i gips. W składzie chemicznym dominują w związku z tym CaO (ok. 42%), SiO<sub>2</sub> (ok. 19%) oraz MgO (ok. 6%). Ze składem surowcowym, jak i sposobem wiązania eternitu, związane są również wysokie straty prażenia (ok. 25%) – analiza składu fazowego wykazała obecność związków uwodnionych oraz kalcytu. W wyniku przeprowadzonych obserwacji w mikroskopie optycznym, w eternicie będącym przedmiotem badań stwierdzono obecność form włóknistych (ryc. 1), zidentyfikowanych w analizie fazowej jako typowe formy azbestu chryzotylowego. Zachowanie się eternitu

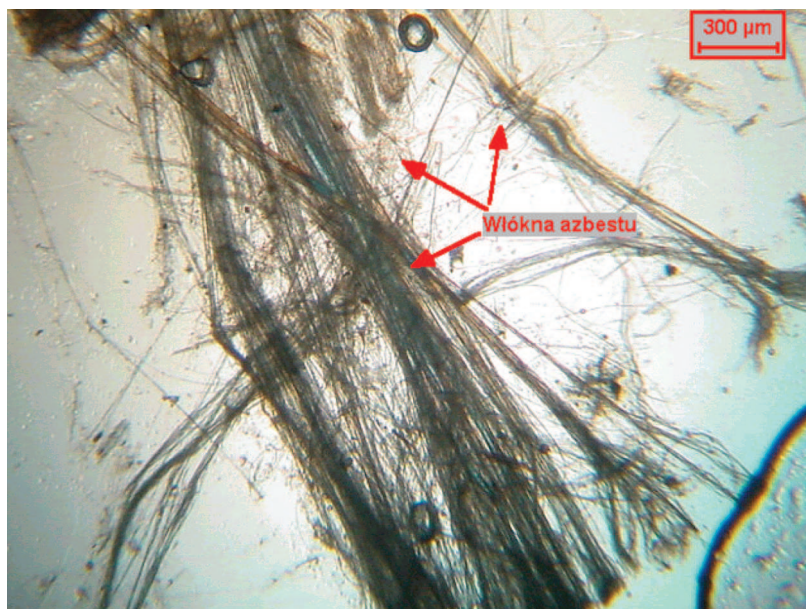
w wysokich temperaturach badano również za pomocą mikroskopu wysoko-temperaturowego. Przeprowadzone obserwacje wykazały, że początek zjawisk wskazujących na pojawienie się fazy ciekłej ma miejsce w temperaturze ok. 1100°C. Udział fazy ciekłej zwiększa się w sposób istotny od temperatury ok. 1350°C. Całkowite stopienie eternitu następuje w temperaturze ok. 1430°C.

Tabela 1

## Właściwości fizykochemiczne eternitu

Skład chemiczny [% mas.]	
Strata prażenia (1025°C)	25,10
SiO <sub>2</sub>	19,26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,87
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,91
TiO <sub>2</sub>	0,18
CaO	41,80
MgO	5,78
K <sub>2</sub> O	0,36
Na <sub>2</sub> O	0,03
S <sub>całkowita</sub>	0,69
Skład fazowy	
CaCO <sub>3</sub> – kalcyt	
Ca(OH) <sub>2</sub> – portlandyt	
Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub> – C <sub>3</sub> S	
Mg <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> – klinochryzotyl	
SiO <sub>2</sub> – kwarc	
Ca <sub>2</sub> AlFeO <sub>5</sub> – brownmilleryt	
CaSO <sub>4</sub> x 2H <sub>2</sub> O – gips	
Temperatury charakterystyczne [°C]	
Temperatura spiekania	1100
Temperatura mięknięcia	1350
Temperatura topnienia	1430

Źródło: Opracowanie własne.



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 1. Włókna azbestu chryzotylowego w eternicie

### 3. Próby topienia eternitu

Próby topienia eternitu prowadzono w elektrycznym piecu lukowo-oporowym w dwóch etapach. W pierwszym etapie były to 3 wytopy zrealizowane w piecu laboratoryjnym, przy wsadzie 30 kg na każdy wytop. W drugim był to wytop w piecu przemysłowym, przy wsadzie 120 kg. Składy zestawów do prób laboratoryjnych przedstawiono w tabeli 2. W każdym przypadku były to mieszaniny eternitu z wapnem palonym i kwarcytem. Opracowano je z myślą o wykorzystaniu produktów topienia do wytwarzania spoiw hydraulicznych, gdzie sprawą kluczową jest osiągnięcie odpowiedniego składu chemicznego i fizycznego. Uziarnienie eternitu w topionych mieszaninach wynosiło 0,5–5 mm, wapna 4–10 mm, kwarcytu 0–1 mm. Przed przystąpieniem do prób topienia, zechowując opracowanych zestawów w wysokich temperaturach będących pomocą mikroskopu wysokotemperaturowego. Rezultaty tych badań przedstawię w tabeli 2. Wyniki z nich, że różnice pomiędzy temperaturami charakterystycznymi poszczególnych zestawów są niewielkie (maks. 55°C) i podobne do temperatur charakteryzujących eternit bez dodatków (tabela 1). Temperatury topienia zawierają się w granicach 1395–1450°C. Skład zestawu do próby przemysłowej (tabela 3) opracowany został na podstawie analizy wyników badań laboratoryjnych. Na tej też podstawie, w próbie przemysłowej uziarnienie wapna zmniejszono do 1–4 mm.

T a b e l a 2

Wyniki badań zestawów wytypowanych do topienia w mikroskopie wysokotemperaturowym

Temperatury charakterystyczne [°C]	Oznaczenie i skład zestawu do topienia		
	1	2	3
		eternit – 79,5% CaO – 20% kwarcyt – 0,5%	eternit – 76% CaO – 23% kwarcyt – 1%
Temperatura spiekania	1 080	1 105	1 075
Temperatura mięknięcia	1 340	1 355	1 375
Temperatura topnienia	1 395	1 450	1 450

Ź r ó d ł o: Jak w tab. 1.

Próby topienia zobrazowano na rycinie 2. Bilans masowo-energetyczny przeprowadzonych prób topienia przedstawiono w tabeli 3. Uzysk stopu w stosunku do masy wsadu wynosił 67–75%. Uwzględniając straty prażenia oraz to co pozostało w piecu, można uznać, że uzysk stopu wynosił praktycznie 100%. We wszystkich przypadkach wsad stopiony był całkowicie. W próbach laboratoryjnych zużycie energii odniesione do masy wsadu wynosiło średnio  $7,37 \times 10^6$  J/kg, przeliczone na masę uzyskanego stopu wynosiło średnio  $10,78 \times 10^6$  J/kg. W próbach przemysłowych było to odpowiednio:  $4,28 \times 10^6$  J/kg i  $5,72 \times 10^6$  J/kg. Jak więc widać, czterokrotne zwiększenie skali próby obniżyło energochłonność procesu topienia blisko dwukrotnie. Należy się spodziewać, że w przypadku dużej, kilkutonowej instalacji przemysłowej i ciągłym prowadzeniu procesu, już na rozgrzanym piecu, energochłonność będzie jeszcze niższa, nie powinna przekroczyć  $3,60 \times 10^6$  J/kg.



Ź r ó d ł o: Jak w ryc. 1.

Ryc. 2. Próby topienia i odlewania eternitu

T a b e l a 3

*Bilans masowo-energetyczny prób topienia badanych zestawów*

Parametr	Próby laboratoryjne			Próba przemysłowa
	eternit – 79,5% CaO – 20% kwarcyt – 0,5%	eternit – 76% CaO – 23% kwarcyt – 1%	eternit – 69% CaO – 28% kwarcyt – 3%	eternit – 69,5% CaO – 27,5% kwarcyt – 3%
	1	2	3	I
Masa wsadu do topienia [kg]	30,0	30,0	30,0	120,0
Masa uzyskanego stopu [kg]	21,0	20,5	20,0	90,0
Masa stopu/masa wsadu [%]	70,0	68,3	66,7	75,0
Czas topienia [s]	4 500	4 800	4 800	4 200
Zużycie energii [J]	212,4 x 10 <sup>6</sup>	226,8 x 10 <sup>6</sup>	223,2 x 10 <sup>6</sup>	514,8 x 10 <sup>6</sup>
Zużycie energii przeliczone na: – masę wsadu [J/kg] – masę stopu [J/kg]	7,09 x 10 <sup>6</sup> 10,12 x 10 <sup>6</sup>	7,56 x 10 <sup>6</sup> 11,05 x 10 <sup>6</sup>	7,45 x 10 <sup>6</sup> 11,16 x 10 <sup>6</sup>	4,28 x 10 <sup>6</sup> 5,72 x 10 <sup>6</sup>

Ź r ó d ł o: Jak w tab. 1.

#### 4. Właściwości fizykochemiczne produktów topienia badanych zestawów

Po zakończeniu procesu topienia część uzyskanego stopu odlewano bezpośrednio do wody (gwałtowne chłodzenie), a część do specjalnie izolowanej formy (wolne chłodzenie). W przypadku próby przemysłowej stop odlewano tylko do wody. Materiał uzyskany w wyniku odlewania do wody, we wszystkich przypadkach, miał postać żużla o zróżnicowanej wielkości ziaren. Zaraz po zakończeniu procesu wodę zlewno, a materiał poddawano suszeniu. Materiał odlany do formy miał postać litego, twardego bloku. Dla wszystkich uzyskanych w ten sposób materiałów oznaczono skład chemiczny i fazowy, a dla produktu próby przemysłowej przeprowadzono również obserwacje mikrostruktury w mikroskopie optycznym. Wyniki tych badań przedstawiono w tabeli 4 oraz na rycinie 3.

T a b e l a 4

Skład chemiczny i fazowy produktów topienia badanych zestawów

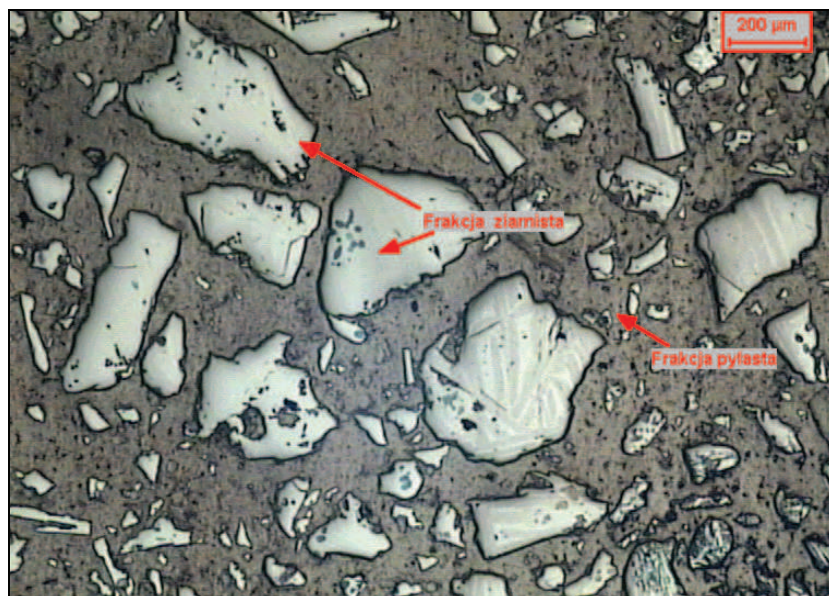
Składnik	Próby laboratoryjne						Próba przemysłowa
	eternit – 79,5% CaO – 20% kwarcyt – 0,5%		eternit – 76% CaO – 23% kwarcyt – 1%		eternit – 69% CaO – 28% kwarcyt – 3%		eternit – 69,5% CaO – 27,5% kwarcyt – 3%
	1		2		3		I
	chłodzona w wodzie W	chłodzona w izolowanej formie F	chłodzona w wodzie W	chłodzona w izolowanej formie F	chłodzona w wodzie W	chłodzona w izolowanej formie F	chłodzona w wodzie W
Skład chemiczny [% mas.]							
Strata prażenia (1025°C)	1,68	+ 0,32	0,93	1,42	0,24	0,32	1,39
SiO <sub>2</sub>	20,93	20,76	20,83	18,58	19,95	21,38	24,06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,48	5,37	6,22	4,03	4,17	2,22	4,60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,65	1,66	3,11	2,39	2,20	1,43	0,39
TiO <sub>2</sub>	0,22	0,23	0,24	0,18	0,18	0,12	0,21
CaO	66,06	68,40	61,62	67,79	63,59	69,16	67,46
MgO	3,69	2,67	6,96	5,57	9,65	5,30	2,00
K <sub>2</sub> O	< 0,01	0,02	0,03	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Na <sub>2</sub> O	0,20	0,49	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Skład fazowy [% mas.]							
Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub> C <sub>3</sub> S	81,6	63,4	55,5	41,1	72,3	62,9	64,6
Ca <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) β-C <sub>2</sub> S larnit	4,8	10,7	15,0	22,2	6,2	10,5	32,9
CaO lime	6,4	5,4	2,0	15,0	2,9	3,8	–
Ca(OH) <sub>2</sub> portlandyt	3,8	5,2	2,8	4,1	6,8	4,0	2,5
Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub> C <sub>3</sub> A	–	12,2	9,3	8,2	3,9	7,5	–
MgO peryklaz	1,3	3,1	6,6	7,7	8,0	8,8	–
Ca <sub>2</sub> FeAlO <sub>5</sub> brownmilleryt	–	–	7,8	1,6	–	1,9	–
Ca <sub>12</sub> Al <sub>14</sub> O <sub>33</sub> majenit	1,6	–	0,8	–	–	–	–
Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> gelenit	0,5	–	–	–	–	0,7	–

Ź r ó d ł o: Jak w tab. 1.



Zgodnie z założeniami przyjętymi w trakcie projektowania składów do topienia, produkty topienia (przeznaczone do wytwarzania spoiw hydraulicznych) powinny charakteryzować się następującym składem chemicznym: CaO – 62 ÷ 68% mas., SiO<sub>2</sub> – 20 ÷ 24% mas., MgO – 2 ÷ 5% mas., Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3 ÷ 6% mas., Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2 ÷ 4% mas. Z analizy składu chemicznego produktów uzyskanych w próbach laboratoryjnych (1, 2 i 3) wynika, że w przypadku zestawów 1 i 3 uzyskane wyniki są bliskie spełnienia uprzednio wymienionych wymagań. Niewielkie odstępstwa (0,34–0,57%) dotyczą zawartości Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i CaO. Dla zestawu 3 odnoszą się one również do MgO, a w przypadku próby 3W odstępstwo to jest znaczne (4,65%). Źródłem wzrostu zawartości MgO jest najprawdopodobniej wymurówka pieca (magnezytowa), a duża różnica między częścią odlaną do wody i do formy to najprawdopodobniej efekt niejednorodności stopu. W przypadku zestawu 2 odstępstwa są istotniejsze i dotyczą obniżonej (o 1,42–3,80%) zawartości SiO<sub>2</sub> oraz podwyższonej (o 1,96%) zawartości MgO. W przypadku produktu pochodzącego z próby przemysłowej odstępstwa były już bardzo niewielkie i dotyczyły jedynie obniżonej zawartości Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,39%), którego znaczna część uległa najprawdopodobniej redukcji w trakcie wytopu (wymurówka węglowa).

Z analizy składu fazowego wynika z kolei, że we wszystkich uzyskanych produktach topienia główną fazę stanowił C<sub>3</sub>S. Jego zawartość w przypadku prób laboratoryjnych wynosi 41 ÷ 82%. Uznać to należy za bardzo korzystne, C<sub>3</sub>S to najważniejszy związek klinkieru cementowego. Jego zawartość w klinkierze cementowym wynosi najczęściej 50–65%. Korzystna jest również obecność β-C<sub>2</sub>S, którego zawartość w produktach prób laboratoryjnych wynosi 5–22%; β-C<sub>2</sub>S to drugi najważniejszy związek klinkieru cementowego. Jego zawartość w klinkierze cementowym wynosi najczęściej 15–25%. Z porównania składu fazowego prób odlewanych do wody z próbami odlewanych do formy wynika, że szybkie schładzanie stopu w każdym przypadku powodowało wzrost zawartości C<sub>3</sub>S oraz obniżenie zawartości C<sub>2</sub>S, który we wszystkich przypadkach występował w formie β. Zatem, nawet w przypadku stopu wolno chłodzonego, nie doszło do przemiany polimorficznej β-C<sub>2</sub>S → γ-C<sub>2</sub>S, która dla klinkieru cementowego jest niekorzystna – wiąże się z tzw. rozpadem krzemianowym, a γ-C<sub>2</sub>S nie posiada własności wiążących.



Źródło: Jak w ryc. 1.

Ryc. 3. Mikrostruktura produktu topienia eternitu (próbka IW)

W przypadku produktu z próby przemysłowej sumaryczna zawartość  $C_3S$  (64,6%) i  $\beta-C_2S$  (32,9%) wynosiła 97,5% i okazała się znacznie wyższa (o 11–34%) w porównaniu z próbkami laboratoryjnymi. We wszystkich próbach laboratoryjnych analiza fazowa wykazała obecność wolnego CaO, co dla cementu jest niekorzystne, powoduje bowiem, po zarobieniu wodą, niestaość objętości. Świadczy to o tym, że w procesie topienia CaO nie przereagował całkowicie. W czasie odlewania do wody uległ do częściowej hydratacji, stąd w składzie fazowym występuje również portlandyt. W próbach nieodlewanych do wody hydratacja CaO nastąpiła najprawdopodobniej na etapie preparowania próbki do badań. W związku z powyższym w próbie przemysłowej uziarnienie wapna zmniejszono z 4–10 mm (próby laboratoryjne) do 1–4 mm. Zmniejszenie uziarnienia spowodowało lepszą homogenizację składu wyjściowego i stopień przereagowania CaO uległ zwiększeniu, w związku z czym stop uzyskany w próbie przemysłowej zawierał zdecydowanie mniej wolnego wapna. Poza tym, w czasie odlewania stopu do wody uległo ono całkowitej hydratacji, stąd w składzie fazowym występuje już tylko w postaci portlandytu. Istotnym, chociaż spodziewanym wnioskiem z analizy składu fazowego wszystkich badanych próbek jest to, że w żadnej z nich nie stwierdzono obecności azbestu. W odniesieniu do próby przemysłowej potwierdziły to również obserwacje mikrostruktury, które nie wykazały obecności form włóknistych w uzyskanym produkcie topienia (ryc. 3).

## 5. Badania nad wykorzystaniem produktów topienia eternitu do wytwarzania spoiw hydraulicznych

Wszystkie produkty uzyskane w trakcie prób topienia eternitu wstępnie rozdrabniano do uziarnienia poniżej 2 mm, a następnie mielono z 5% dodatkiem gipsu, do uziarnienia charakterystycznego dla cementów portlandzkich. Dla wszystkich uzyskanych w ten sposób spoiw określono: powierzchnię właściwą, czas wiązania, stałość objętości oraz wytrzymałość na zginanie i ściskanie. Rezultaty badań przedstawiono w tabeli 5. Porównawczo, przedstawiono w niej również wyniki badań cementu portlandzkiego klasy CEM I 42.5 R. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że wszystkie spoiwa otrzymane ze stopów chłodzonych w wodzie (1W, 2W, 3W, IW), spełniają wymagania określone przez normę PN-EN 197-1 dla cementu klasy CEM I 42.5 R. Wymagania te spełnia również spoiwo otrzymane w próbie 1, ze stopu wolno chłodzonego (1F). Najlepsze rezultaty uzyskano dla spoiwa otrzymanego w próbie przemysłowej. W tym przypadku wytrzymałość i tempo jej wzrostu były najwyższe. Dla tego spoiwa wykonano również badania mrozoodporności. Po 25 cyklach zamrażania i odmrażania spadek wytrzymałości wyniósł: 0,84% (na zginanie) i 0,20% (na ściskanie), a ubytek masy 0,08%. Badania porównawcze przeprowadzone dla cementu portlandzkiego CEM I 42.5 R dały analogiczne wyniki.

Tabela 5

Właściwości fizyczne spoiw wytworzonych z produktów topienia eternitu

Oznaczenie prób spoiwa		Powierzchnia właściwa [cm <sup>2</sup> /g]	Ilość wody [%]	Czas wiązania [min]		Stalość objętości [mm]	Wytrzymałość [MPa]					
				po-czątek	ko-niec		na zginanie			na ściskanie		
							2 dni	7 dni	28 dni	2 dni	7 dni	28 dni
Próby laboratoryjne	1W	3 680	27,2	159	200	2	4,6	6,0	7,4	22,6	35,2	49,3
	1F	3 700	26,0	90	150	2	4,1	5,9	7,0	21,6	34,2	49,1
	2W	3 660	25,6	139	204	0	4,6	6,2	7,1	22,4	33,2	46,6
	2F	3 660	24,6	177	282	42	2,1	3,5	4,6	7,2	18,3	30,8
	3W	3 690	24,6	87	192	8	4,2	6,0	7,1	22,1	33,5	47,9
	3F	3 680	24,2	128	220	34	2,6	4,2	5,7	10,0	22,6	36,8
Próba przemysłowa	IW	3 680	25,4	125	190	1	4,6	6,1	7,4	23,0	34,8	51,4
Cement portlandzki „Góraźdże” CEM I 42.5 R		3 720	26,5	100	160	0	4,9	6,3	7,3	23,6	35,1	48,8
CEM I 42.5 R wg PN-EN 197-1		-	-	≥ 60	-	≤ 10	-	-	-	≥ 20,0	-	42,5 ÷ ÷ 62,5

Źródło: Jak w ryc. 1.

W następnej kolejności wykonano próby betonów z udziałem spoiwa uzyskanego ze stopienia eternitu (IW) oraz porównawczo z udziałem cementu portlandzkiego CEM I 42.5 R. Mieszanki betonowe przygotowano według wymagań podanych w recepturze betonu wzorcowego I, zgodnie z normą PN-EN 480-1. Skład mieszanek był następujący:

– piasek kwarcytowy: 0–2 mm	–	633,8 kg/m <sup>3</sup> ,
– kruszywo bazaltowe: 2–5 mm	–	263,3 kg/m <sup>3</sup> ,
5–8 mm	–	224,3 kg/m <sup>3</sup> ,
8–16 mm	–	536,2 kg/m <sup>3</sup> ,
16–22 mm	–	146,2 kg/m <sup>3</sup> ,
22–31,5 mm	–	146,2 kg/m <sup>3</sup> ,
– spoiwo (cement)		350,0 kg/m <sup>3</sup> ,
– woda		178,5 kg/m <sup>3</sup> .

Z tak przygotowanych mieszanek betonowych wykonano próbki o wymiarach 150 x 150 x 150 mm, na których określono: wytrzymałość na ściskanie, gęstość objętościową, nasiąkliwość i wodoszczelność. Rezultaty badań zaprezentowano w tabeli 6. Wynika z nich, że beton z udziałem spoiwa pochodzącego ze stopienia eternitu charakteryzuje się praktycznie takimi samymi, bardzo dobrymi własnościami, jak beton z udziałem wysokojakościowego cementu portlandzkiego klasy CEM I 42.5 R.

T a b e l a 6

*Własności betonu wytworzonego z udziałem produktu topienia eternitu jako spoiwem*

Oznaczenie prób betonów	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]		Gęstość objętościowa w stanie nasycenia wodą [kg/m <sup>3</sup> ]	Nasiąkliwość [%]	Wodoszczelność (głębokość penetracji wody pod ciśnieniem 1,2 MPa) [mm]
	7 dni	28 dni			
B/IW (spoiwo – produkt topienia eternitu – 3680 cm <sup>2</sup> /g)	44,8	55,7	2 570	3,90	18
B/42.5 R (spoiwo – cement CEM I 42.5 – 3720 cm <sup>2</sup> /g)	47,7	57,1	2 550	3,80	19

Ź r ó d ł o: Jak w tab. 1.

## 6. Podsumowanie

- Przeprowadzono próby topienia eternitu z dodatkiem wapna i kwarcytu. Wykonano je w elektrycznym piecu łukowo-oporowym, w warunkach laboratoryjnych, a następnie w przemysłowych. We wszystkich przypadkach proces topienia spowodował całkowite i nieodwracalne „zniszczenie” struktury włóknistej azbestu. W otrzymanych produktach topienia obecności azbestu nie stwierdzono.
- Wykazano, że korygując odpowiednio skład chemiczny eternitu poddawanego topieniu i dobierając odpowiednie warunki chłodzenia powstałego stopu, można uzyskać materiał, w którego składzie fazowym dominują krzemiany wapniowe  $C_2S$  i  $C_3S$ . Stwarza to realne możliwości wykorzystania produktów tej metody unieszkodliwiania eternitu do produkcji cementu.
- Cement wytworzony z produktu topienia eternitu charakteryzował się wysoką wytrzymałością na zginanie i ściskanie (7,4 MPa–51,4 MPa) oraz bardzo dobrym tempem wzrostu wytrzymałości (tab. 5), co pozwala zaliczyć go do wysokojakościowej klasy CEM I 42.5 R. Charakteryzowała go również wysoka mrozoodporność. Wykonany z tego cementu beton cechował się wysoką wytrzymałością na ściskanie (55,7 MPa), bardzo dobrymi właściwościami reologicznymi, wysoką wodoszczelnością (18 mm) i niską nasiąkliwością (3,9%).
- Biorąc pod uwagę, że energochłonność procesu topienia eternitu w piecu łukowo-oporowym wynosi ok.  $3,6 \times 10^6$  J/kg, koszt jego utylizacji tą metodą nie powinien przekroczyć 0,8 zł/kg. Przy cenie cementu ok. 0,45 zł/kg i kosztach deponowania eternitu na składowiskach odpadów niebezpiecznych ok. 0,5 zł/kg, przedsięwzięcie to może być ekonomicznie uzasadnione.

## Literatura

- [1] Brzozowski A., Obmiński A., *Gdzie występuje potrzeba zabezpieczenia lub usunięcia azbestu w Polsce*, „Bezpieczeństwo Pracy” 2004, nr 4, s. 11–15.
- [2] Piłat J., Zielińska A., *Metody utylizacji wyrobów zawierających azbest*, „Materiały Budowlane” 2006, nr 11, s. 49–53.
- [3] Makoudi S., *Unieszkodliwianie materiałów zawierających azbest na przykładzie rozwiązań francuskich*, „Technika Poszukiwań Geologicznych – Geotermia, Zrównoważony Rozwój” Wydawnictwo IGSMiE PAN Kraków 2007, nr 1, s. 93–100.
- [4] Gualtieri A., Tartaglia A., *Thermal decomposition of asbestos and recycling in traditional ceramics*, „Journal of European Ceramic Society” 2000, Vol. 20, s. 1409–1418.
- [5] Zaremba T., Peszko M., *Investigation of the thermal modification of asbestos wastes for potential use in ceramic formulation*, „Journal of Thermal Analysis and Calorimetric” 2008, Vol. 92, No. 3, s. 873–877.
- [6] Zaremba T., Krzakała A., Piotrowski J., Garczorz D., *Zastosowanie azbestu chryzotylowego jako surowca do produkcji wyrobów ceramicznych o spieczonym czerepie*, „Materiały Ceramiczne” 2010, nr 2, s. 149–155.

[7] P a r o s a R. (autor), A T O N – HT S.A (firma zgłaszająca), Sposób utylizacji materiałów zawierających azbest i urządzenie do utylizacji materiałów zawierających azbest. Patent PL 209165 udzielony 29.07.2011.

*JERZY WITEK  
HENRYK MRÓZ  
JÓZEF BARAŃSKI  
JERZY BRACH*

NEUTRALISATION OF ASBESTOS-CONTAINING WASTE USING  
THE METHOD OF MELTING IN AN ARC RESISTANCE FURNACE

**Keywords:** asbestos, asbestos neutralisation, melting, hydraulic binding agents.

Melting tests of asbestos-containing waste were carried out in an electric arc resistance furnace. „Eternit”, which accounts for more than 90% of asbestos-containing waste, was selected for melting tests. Melting tests were conducted in laboratory arc resistance furnace, and next in an industrial one. It was shown that the fibrous structure of asbestos contained in „eternit” can be completely „destroyed” this way. It was also demonstrated that adjusting the chemical composition of „eternit” properly and choosing the appropriate cooling conditions for the so obtained melt it is possible to obtain a material in which the predominant phases are calcium silicates  $C_2S$  and  $C_3S$ . Cement prepared from this material was characterized by high flexural and compressive strength (7,4 MPa–51,4 MPa), which allows it to include to the high-grade CEM I 42.5 R.