WIERTNICTWO NAFTA GAZ • TOM 28 • ZESZYT 3 • 2011

Tomasz Śliwa*, Mirosław Sowa*, Stanisław Stryczek*, Andrzej Gonet*, Albert Złotkowski*, Aneta Sapińska-Śliwa*, Dariusz Knez*

BADANIA STWARDNIAŁYCH ZACZYNÓW CEMENTOWYCH Z DODATKIEM GRAFITU**

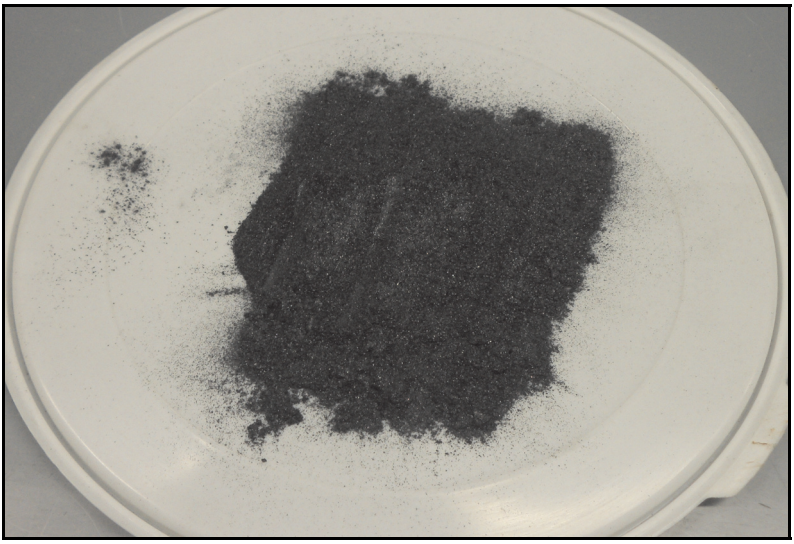
1. WPROWADZENIE

W coraz większej liczbie państw na świecie, w których warunki są podobne jak w Polsce, stosuje się w systemach grzewczych pompy ciepła i wymienniki otworowe, które stanowią elementy systemu pozyskiwania i wprowadzania ciepła do górotworu. Aby proces ten był jak najbardziej efektywny, należy przy projektowaniu wymienników otworowych uwzględnić kilka zagadnień. Jednym z nich jest przewodnictwo cieplne materiału wypełniającego przestrzeń pomiędzy górotworem a rurami wymiennika [1].

Do badań wybrano CEM II/B-V 32,5 R, cement portlandzki popiołowy klasy 32,5 z dodatkiem lotnego popiołu krzemionkowego. Głównym kryterium wyboru tego cementu, porównywalnego z zaawansowanymi cementami stosowanymi w wierceniach naftowych, była jego cena oraz ogólna dostępność. Cement CEM II/B-V 32,5 R jest środkiem wykazującym się odpowiednimi właściwościami, tj. niskim skurczem przygotowanego przy jego użyciu betonu oraz korzystną pompowalnością mieszanki betonowej.

Aby zwiększyć przewodność cieplną, do zaczynu cementowego dodano grafit [2]. Użyto grafitu płatkowego firmy SINOGRAF SA [3] o oznaczeniu FG-192. Grafit płatkowy jest odmianą grafitu naturalnego, który jest wynikiem metamorfizmu bogatych w węgiel substancji organicznych. Ma wysoko uporządkowaną strukturę krystaliczną i charakterystyczny metaliczny połysk, z tego względu nazywany jest również grafitem srebrzystym lub krystalicznym (rys. 1).

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków
** Praca zrealizowana w ramach badań statutowych Katedry Wiertnictwa i Geoinżynierii WWNiG AGH



Rys. 1. Grafit płatkowy wykorzystany do badań

Podstawowe właściwości grafitu to dobre przewodnictwo cieplne i elektryczne [3], niski współczynnik rozszerzalności cieplnej, wysoka odporność chemiczna i termiczna oraz doskonałe właściwości smarne. Charakter budowy przestrzennej grafitu płatkowego powoduje łatwość zrywania wiązań pomiędzy sąsiednimi płaszczyznami i tworzenie struktury łuskowatej, nawet przy największym rozdrobieniu. Konsekwencją warstwowej budowy jest również znaczna anizotropia właściwości grafitu płatkowego.

Czynnikami zmiennymi próbek zaczynu były:

- współczynnik wodno-mieszaninowy (w/m = 1,0 oraz w/m = 0,8),
- procentowa zawartość grafitu w stosunku do sumy masy wszystkich składników stałych (0%, 10% oraz 30%).

Na podstawie przyjętych kryteriów oraz proporcji opracowano sześć receptur (tab. 1), według których wykonano zaczyny cementowe.

W tabelach 2–5 podano otrzymane wartości wytrzymałości dla zmiennej zawartości grafitu w zaczynie i różnych wartości współczynników wodno-mieszaninowych.

Zaczyn uszczelniający po stwardnieniu w otworze powinien być trwały, aby móc izolować warstwy wodonośne. Materiał taki powinien mieć odpowiednią wytrzymałość na zginanie i ściskanie.

W związku z tymi wymaganiami po 28 dniach od związania przeprowadzono następujące badania na stwardniałych zaczynach cementowych:

- wytrzymałość na zginanie,
- wytrzymałość na ściskanie,
- przewodność cieplna za pomocą urządzenia ISOMET 2104,
- przewodność cieplna za pomocą urządzenia TT-TC-01.

Tabela 1

Receptury poszczególnych badanych zaczynów cementowych

			Współczynnik w/m					
			w/m = 1,0			w/m = 0,8		
Nr próbki			I	II	III	IV	V	VI
Procentowy udział grafitu		%	0	10	30	0	10	30
Woda		g	2000	2000	2000	1600	1600	1600
Składniki stałe	bentonit	g	60	60	60	60	60	60
	grafit	g	0	200	600	0	200	600
	cement	g	1940	1740	1340	1940	1740	1340
	Suma	g	2000	2000	2000	2000	2000	2000

2. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI NA ZGINANIE

Badanie wytrzymałości próbek na zginanie wykonano za pomocą przyrządu Michaelisa. Działanie tego aparatu polega na obciążaniu belki śrutem zsypywanym z zawieszonego naczynia z szybkością około 100 g/s. Belkę układa się na dwóch wałkach oddalonych od siebie o ok. 10 cm. Przy wykonywaniu pomiaru siły zginającej za pomocą przyrządu Michaelisa po ułożeniu beleczki między wałkami należy zawiesić naczynie i otworzyć wysyp śrutu. Na belkę naciska wówczas w połowie jej długości od góry wałek z siłą wzrastającą wraz z ilością zsypywanego śrutu. Gdy belka ulegnie złamaniu, naczynie wraz ze śrutem należy zważyć z dokładnością do 10 g (puste naczynie waży 1100 g).

Aby wyniki były miarodajne, wykonanuje się po trzy pomiary każdej receptury zaczynu, a następnie oblicza średnią. Otrzymane wyniki zamieszono w tabeli 2.

Tabela 2

Wyniki pomiarów przyrządem Michaelisa (po 28 dniach od zarobienia)

		Współczynnik wodno-mieszaninowy					
		w/m = 1,0			w/m = 0,8		
Nr próbki		I	II	III	IV	V	VI
Procentowy udział grafitu	%	0	10	30	0	10	30
Pomiar 1	g	2100	1950	1100	3170	2780	1415
Pomiar 2	g	2000	1745	1100	3100	2780	1200
Pomiar 3	g	2400	1570	1100	3460	2880	1100
Wartość średnia	g	2167	1755	1100	3243	2813	1238

Tak otrzymane wyniki należy przeliczyć i wyrazić w jednostkach wytrzymałości, tj. megapaskalach. Wytrzymałość na zginanie oznaczoną przyrządem Michaelisa należy obliczyć wzorem:

$$R_g = 1{,}17 \cdot \frac{m}{1000} \tag{1}$$

gdzie m – wartość średnia masy naczynia ze śrutem, g.

Wartości wytrzymałości na zginanie podane w megapaskalach zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 3

Wytrzymałość próbek na zginanie

		Współczynnik wodno-mieszaninowy					
		w/m = 1,0			w/m = 0,8		
Nr próbki		I	II	III	IV	V	VI
Procentowy udział grafitu	%	0	10	30	0	10	30
Wytrzymałość na zginanie	MPa	2,57	2,05	1,29	3,79	3,29	1,45

3. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE

Wytrzymałość na ściskanie jest to największe naprężenie, jakie wytrzymuje badana próbka podczas zgniatania. Aby określić wartość wytrzymałości na ściskanie, należy się posłużyć prasą hydrauliczną. Przygotowanie próbki do takiego badania polega na uzyskaniu dwóch idealnie równoległych, płaskich płaszczyzn o znanej powierzchni. Wszystkie wymiary ścian powinny wynosić ok. 50 mm. W zależności od rodzaju badania próbka powinna być w stanie powietrznosuchym lub nasycona wodą. Tak przygotowaną próbkę umieszcza się na dolnej płycie prasy hydraulicznej i dociska delikatnie górną płytą (rys. 2).

Ściskanie powinno przebiegać w sposób ciągły, a szybkość wzrostu naprężeń powinna wynosić 5÷10 N/s. Prasa połączona jest z siłomierzem, który rejestruje maksymalne wychylenie działającej siły. Wykonano sześć pomiarów każdej receptury zaczynu (tab. 4).

Przed zniszczeniem próbek w prasie zmierzono powierzchnię, na jaką działa siła. Wszystkie próbki są jednakowe, a ich powierzchnia wynosi 24 cm^2. Miarą wytrzymałości na ściskanie jest iloraz siły niszczącej próbkę oraz powierzchni, na jaką ta siła działa:

$$R_s = \frac{P_{\max}}{F} \tag{2}$$

gdzie:

$P_{\max}$ – maksymalna siła ściskająca, N,

F – powierzchnia, na jaką działa siła, m^2.

Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 5.

Rys. 2. Widok ogólny – prasa hydrauliczna z połączonym siłomierzem

Tabela 4

Wyniki pomiarów siły potrzebnej do zniszczenia próbki w prasie hydraulicznej (po 28 dniach od zarobienia)

		Współczynnik wodno-mieszaninowy					
		w/m = 1,0			w/m = 0,8		
Nr próbki		I	II	III	IV	V	VI
Procentowy udział grafitu	%	0	10	30	0	10	30
Pomiar 1	daN	600	500	300	1400	800	500
Pomiar 2	daN	700	600	400	1400	1000	600
Pomiar 3	daN	500	700	400	1100	700	400
Pomiar 4	daN	500	500	300	1000	900	400
Pomiar 5	daN	600	500	400	1300	1200	500
Pomiar 6	daN	600	600	300	1500	1000	600
Wartość średnia	daN	583	567	350	1283	933	500

Tabela 5

Wytrzymałość próbek na ściskanie

		Współczynnik wodno-mieszaninowy					
		w/m = 1,0			w/m = 0,8		
Nr próbki		I	II	III	IV	V	VI
Procentowy udział grafitu	%	0	10	30	0	10	30
Wytrzymałość na ściskanie	MPa	2,43	2,36	1,46	5,35	3,89	2,08

4. BADANIE PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ

Badanie lambdametrem ISOMET 2104

W celu wykonania pomiarów przewodności cieplnej urządzeniem ISOMET 2104 wykonano dla każdej receptury zaczynu okrągłą próbkę o grubości ok. 1,5 cm (rys. 3), która dojrzewała w wodzie przez 28 dni. Następnie należało wyjąć próbkę z wody i przygotować do dalszych badań.

Rys. 3. Próbka przygotowana do badania aparatem ISOMET 2104

Aparat ISOMET 2104 firmy Aplied Precision Inc., który wykorzystano do przeprowadzenia badania, znajduje się na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Ceramiki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Jest to aparat służący do wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła metodą nieustalonego przepływu ciepła, współpracujący z przylgowymi czujnikami temperatury oraz z tzw. sondami cieplnymi [2].

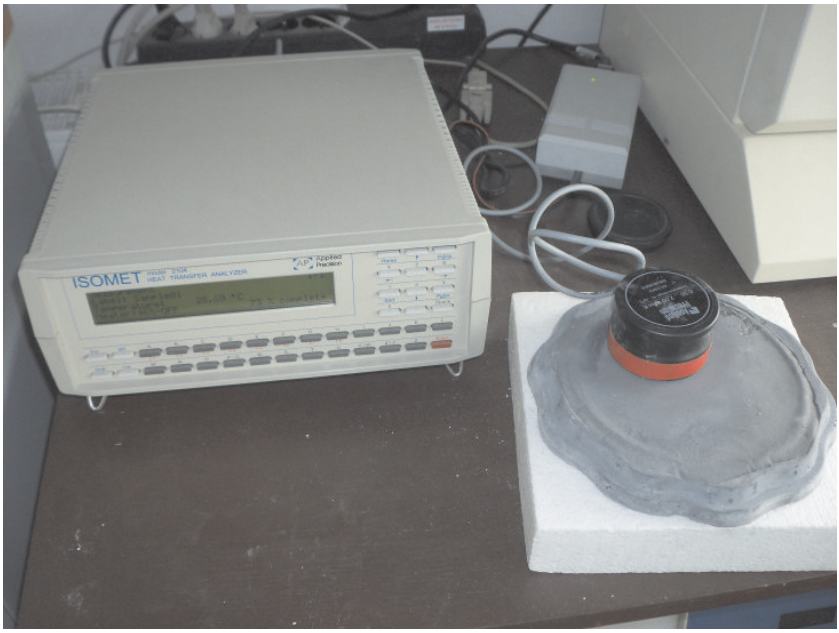
Aparatem można badać bezinwazyjnie próbki w formie płyt o wymiarach nie mniejszych niż 50 mm × 50 mm × 10 mm, górnego ograniczenia wielkości próbek nie ma. Pomiar przewodności cieplnej w zakresie 0,015÷6,00 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ zależy od użytej głowicy pomiarowej.

Aby próbka mogła zostać przebadana tym aparatem, muszą zostać spełnione następujące warunki:

– Na próbce należy wyszlifować gładką powierzchnię o średnicy minimum 7 cm. Pomiar odbywa się za pomocą głowicy o średnicy ok. 6 cm, w której umieszczona jest grzałka. Ponieważ powietrze ma niską przewodność cieplną, ważne jest, aby głowica szczelnie przylegała do próbki.

– Próbka musi być stabilna termicznie – w trakcie pomiaru temperatura próbki nie może się zmieniać (np. pod wpływem temperatury otoczenia). Ponieważ aparat bada zmianę temperatury w czasie i na tej podstawie określa współczynnik przewodności cieplnej, każda zmiana temperatury (wzrost lub spadek) niewywołana przez urządzenie powodowałaby zwiększenie błędu pomiarowego.
– Próbkę należy wysuszyć – zaczyn nie może zawierać w swej strukturze wody, należy powtarzać suszenie aż do uzyskania stałej masy. Urządzeniem tym bada się przewodność cieplną szkieletu skalnego. Najpierw suszy się próbkę w miejscu położenia głowicy, jednocześnie mierząc zmianę temperatury próbki. Następnie, po zaprzestaniu grzania, aparat mierzy spadek temperatury. Obecność wody powodowałaby odbiór przez nią ciepła i transportowanie go poza obręb objęty pomiarem.

Po odpowiednim przygotowaniu próbek przystąpiono do przeprowadzenia pomiarów. Na próbce umieszczono głowice pomiarową. Urządzenie stabilizuje przez chwilę temperaturę badanego materiału, a następnie dokonuje pomiaru (rys. 4), który trwa 8÷10 minut. Po tym czasie można odczytać wartość zmierzonej przewodności cieplnej.



Rys. 4. Próbka w trakcie badania urządzeniem ISOMET 2104

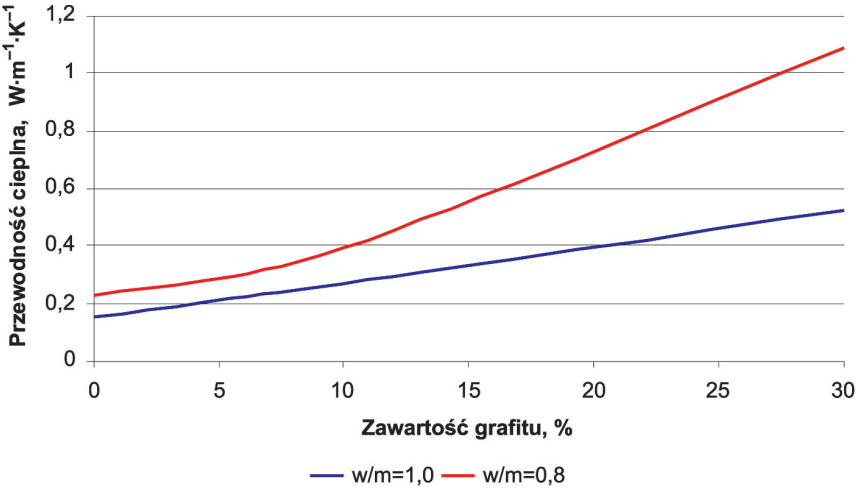
Wszystkie wyniki badań wszystkich próbek przedstawiono w tabeli 6.

Graficzne przedstawienie zależności przewodności cieplnej od procentowej zawartości grafitu oraz od współczynnika wodno – mieszaninowego pokazano na rysunku 5.

Tabela 6

Zestawienie wyników pomiarów przewodności cieplnej (λ) próbek aparatem ISOMET 2104

		Współczynnik wodno-mieszaninowy					
		w/c = 1,0			w/c = 0,8		
Procentowa zawartość grafitu	%	0	10	30	0	10	30
Pomiar λ 1	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,155	0,278	0,534	0,236	0,398	1,120
Pomiar λ 2	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,151	0,262	0,512	0,221	0,381	1,050
Średnia λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,153	0,270	0,523	0,229	0,390	1,085



Rys. 5. Wykres zależności przewodności cieplnej od zawartości grafitu i współczynnika wodno-mieszaninowego

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzić można, że największy wpływ na zmianę współczynnika przewodności cieplnej ma współczynnik w/m. Wynika to z faktu, że wraz ze wzrostem ilości wody wykorzystanej do zarobienia zaczynu spada gęstość próbki po jej wysuszeniu. Do przebiegu procesu wiązania cementu potrzeba wody w ilości odpowiadającej wartości współczynnika w/m = 0,2. Dlatego w przypadku wyższych wartości w/m nadmiar wody przyczynia się do zwiększenia porowatości stwardniałego zaczynu. Im więcej jest wody, tym więcej może jej odparować podczas suszenia, a w jej miejsce w porach znajdzie się powietrze, którego przewodność cieplna wynosi 0,04 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. W wyniku tego wysuszone próbki charakteryzują się stosunkowo małą gęstością (od 800 kg/m^3 do 1000 kg/m^3), co powoduje względnie niskie wartości przewodności cieplnej.

Oprócz zmiany współczynnika wodno-mieszaninowego wpływ na zmianę przewodności cieplnej próbek ma też procentowa zawartość grafitu. Z wyników można wywnioskować, że zwiększenie ilości grafitu w próbce zwiększa jej przewodność cieplną.

Należy zauważyć, że wyniki badań uzyskane w warunkach laboratoryjnych nie pokrywają się z panującymi w otworze wiertniczym. Toteż na podstawie wyników tych badań można jedynie stwierdzić względny wzrost współczynnika przewodności cieplnej w przypadku obniżenia współczynnika wodno-mieszaninowego oraz wzrost zawartości grafitu płatkowego w próbce.

Badanie lambdametrem typu ISOMET TT-TC-01

W celu pomiaru przewodności cieplnej próbek w stanie zawodnionym wykorzystano urządzenie typu TT-TC-01 znajdujące się w Laboratorium Geoenergetyki Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH. Urządzenie to przeznaczone jest do pomiaru przewodności cieplnej próbek ciał stałych o minimalnej grubości 5 mm oraz powierzchni przylegającej do czujnika 20 mm × 50 mm. Centralna część czujnika (rys. 6) wykonana została z materiału o niskim współczynniku oporu termicznego oraz zawiera skonsolidowane trzy równoległe, bardzo wąskie oraz bardzo cienkie przewodniki prądu elektrycznego o długości równej czerwonemu polu [4].

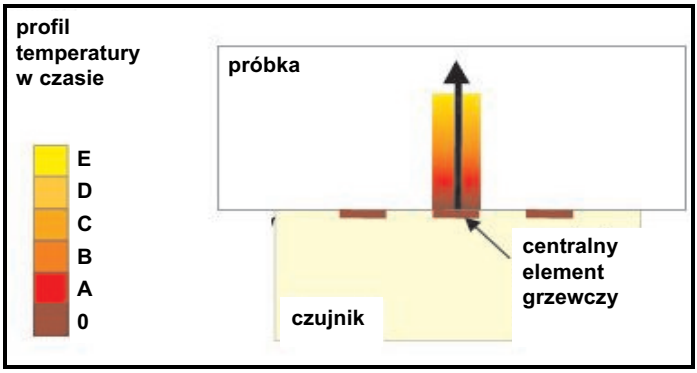
Rys. 6. Wykonawcza część czujnika urządzenia TT-TC-01

Elementem pomiarowym urządzenia TT-TC-01 jest centralny przewodnik zatopiony w materiale czujnika. Pozostałe dwa przewodniki pełnią funkcję pomocniczą. Przewodnik centralny podczas rozpoczęcia pomiaru przewodności cieplnej wytwarza ciepło, które rozprzestrzeniać się powinno pionowo ku górze w badanej próbce (rys. 7).

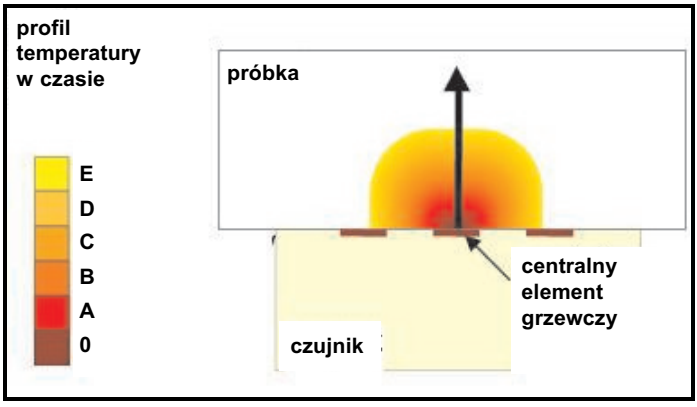
W rzeczywistości jednak strumień ciepła rozprzestrzenia się w profilu kulistym od źródła ciepła, co zmienia ilość energii (wartość znana) odprowadzonej od jednostki powierzchni próbki. Zjawisko to zwiększa intensywność rozchodzenia się ciepła w próbce oraz prowadzi do zmniejszenia dokładności pomiaru (rys. 8).

Aby ukierunkować strumień ciepła możliwie pionowo, zastosowano dwa pomocnicze elementy grzewcze wytwarzające „zaporę cieplną" dla strumienia ciepła wytwarzanego przez główny element grzejny (rys. 9).

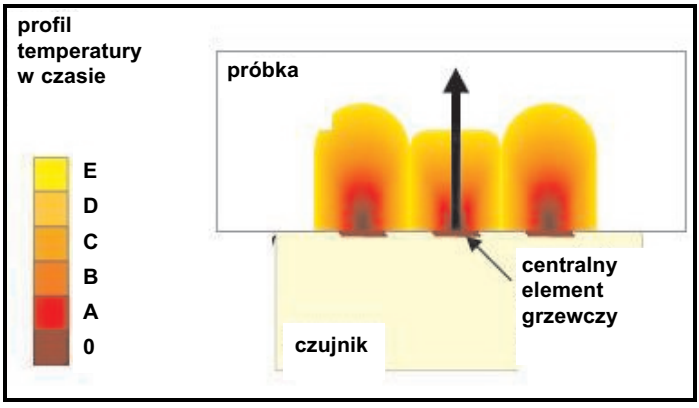
Strumień ciepła wytwarzany przez centralny element grzewczy jest nieco opóźniony w stosunku do strumieni pomocniczych. Czas opóźnienia jest krótszy od „czasu rozpoczęcia pomiaru". Cały czas pomiaru obejmuje wytwarzanie ciepła przez elementy pomocnicze.



Rys. 7. Schemat pożądanego rozprzestrzeniania się strumienia ciepła w próbce



Rys. 8. Schemat rzeczywistego rozprzestrzeniania się strumienia ciepła w próbce



Rys. 9. Schemat rozprzestrzeniania się strumienia ciepła w próbce podczas użycia dodatkowych elementów grzewczych

Pomiar przewodności cieplnej urządzeniem TT-TC-01 odbywa się na podstawie porównania krzywej regresji próbki o znanym współczynniku przewodności cieplnej dostarczonej przez producenta urządzenia i krzywej uzyskanej podczas pomiaru współczynnika przewodności cieplnej próbki badanej. Sam pomiar przyrostu napięcia w funkcji czasu opiera się na zmianie rezystancji głównego elementu grzewczego podczas pomiaru. Do uzyskanej krzywej przyrostu napięcia automatyczne dopasowywana jest krzywa regresji w granicach czasu zadanych przez operatora, a więc od początku czasu pomiaru do końca jego trwania. Kolejno uzyskane krzywe dla badanej próbki porównywane są z krzywą kalibracyjną oraz wyznaczany jest współczynnik przewodności cieplnej próbki. Wynik pomiaru podawany jest w tabeli wraz ze współczynnikiem korelacji krzywej regresji [4].

Rozpoczęcie testu jest równoznaczne z rozpoczęciem ogrzewania próbki pomocniczymi elementami grzewczymi. Równocześnie rozpoczyna się pomiar napięcia, jakim zasilany jest element główny i które na początku testu wynosi 0. Zasilanie elementu głównego rozpoczyna się ok. 0,2 s po rozpoczęciu ogrzewania obwodami pomocniczymi oraz trwa do końca testu. Podobnie pomiar rozpoczyna się w momencie „czasu rozpoczęcia pomiaru" i trwa do końca testu. Ponadto przyrost napięcia jest rejestrowany w funkcji czasu na arkuszu. Przyrost napięcia jest związany ze wzrostem rezystancji głównego elementu grzewczego podczas pomiaru.

Jeśli próbka dobrze przewodzi ciepło, ma wysoką przewodność cieplną, wtedy dobrze odprowadza ciepło od głównego elementu grzewczego, jednocześnie powodując niewielki przyrost jego rezystancji, a zatem mały wzrost napięcia. Jeśli próbka źle przewodzi ciepło, ma niską przewodność cieplną, wtedy źle odprowadza ciepło od głównego elementu grzewczego, jednocześnie powodując duży przyrost jego rezystancji, a zatem duży wzrost napięcia [4].

Przyczynami niedokładności pomiaru mogą być:

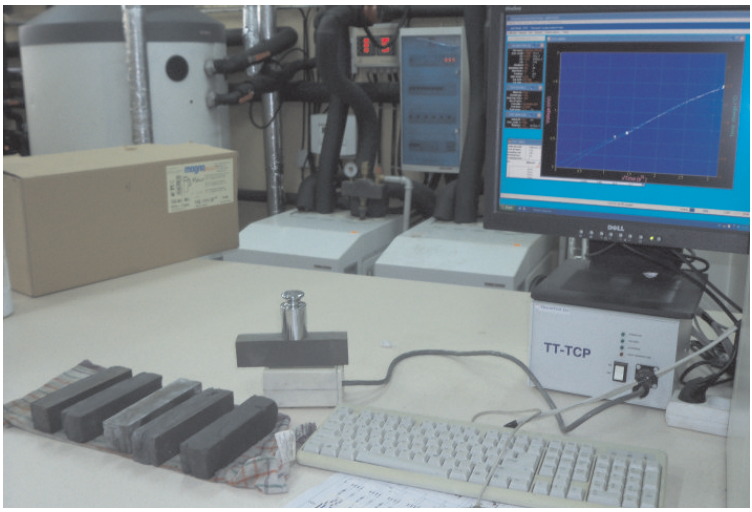
- złe przyleganie próbki do czujnika na całej długości,
- niewłaściwy zakres krzywej kalibracyjnej,
- zbyt krótki czas rozpoczęcia testu,
- zbyt krótki czas całkowitego pomiaru.

Ponieważ ważne jest dokładne przyleganie próbki do czujnika, dlatego do badań wykorzystano belki przygotowane tak jak do badań wytrzymałościowych, które charakteryzują się równymi powierzchniami oraz maksymalną wilgotnością w wyniku przechowywania w wodzie.

Przeprowadzono łącznie cztery rodzaje pomiarów, zmieniając charakter kontaktu próbki z czujnikiem:

- po wytarciu próbki,
- mocno zwilżona powierzchnia styku,
- mocno zwilżona powierzchnia styku wraz z obciążeniem próbki,
- z zastosowaniem środka powierzchniowo czynnego.

Wykonano pięć pomiarów próbek z każdym typem kontaktu. Próbkę umieszczono na głowicy pomiarowej tak, aby zakryta była cała powierzchnia grzejna (rys. 10).



Rys. 10. Ogólny widok stanowiska do pomiaru przewodności cieplnej za pomocą urządzenia TT-TCP-01

Najpierw wykonano pomiar przewodności cieplnej urządzeniem TT-TC-01 z suchą powierzchnią styku. Otrzymane wyniki dość znacznie się różnią, co można wytłumaczyć tym, że kontakt między próbką a czujnikiem był prawdopodobnie niedokładny. Wyniki przedstawia tabela 7.

Tabela 7

Wyniki pomiarów przewodności cieplnej (λ) próbek z suchą powierzchnią styku

		Współczynnik wodno-mieszaninowy					
		w/m = 1,0			w/m = 0,8		
Nr próbki		I	II	III	IV	V	VI
Procentowy udział grafitu	%	0	10	30	0	10	30
Pomiar λ 1	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,46	0,59	0,76	0,61	0,57	0,84
Pomiar λ 2	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,47	0,53	0,71	0,5	0,48	0,61
Pomiar λ 3	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,45	0,52	0,71	0,47	0,53	0,86
Pomiar λ 4	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,46	0,53	0,72	0,51	0,55	0,73
Pomiar λ 5	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,47	0,54	0,69	0,58	0,55	0,79
Wartość średnia λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,46	0,54	0,72	0,53	0,54	0,77

Następnie wykonano badanie obficie zwilżając próbkę wodą, aby przybliżyć warunki panujące w otworze wiertniczym. Otrzymano wyniki zestawione w tabeli 8.

Tabela 8

Wyniki badań przewodności cieplnej (λ) przy wilgotnej powierzchni próbek

		Współczynnik wodno-mieszaninowy					
		w/m = 1,0			w/m = 0,8		
Nr próbki		I	II	III	IV	V	VI
Procentowy udział grafitu	%	0	10	30	0	10	30
Pomiar λ 1	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	3,38	3,66	4,22	2,76	4,20	4,80
Pomiar λ 2	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	3,24	3,15	3,55	2,29	4,15	4,31
Pomiar λ 3	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	3,20	3,24	3,99	2,58	4,10	4,99
Pomiar λ 4	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	3,13	2,85	4,91	2,84	4,01	5,46
Pomiar λ 5	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	2,89	2,72	4,93	2,35	4,05	5,52
Wartość średnia λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	3,17	3,12	4,32	2,56	4,10	5,02

Aby zapewnić lepszy kontakt próbki z czujnikiem, badaną próbkę obciążono dodatkowo masą 1 kg, również zapewniając wysoką wilgotność na styku powierzchni. Wyniki zawarto w tabeli 9.

Tabela 9

Wyniki pomiarów przewodności cieplnej (λ) próbek z dodatkowym obciążeniem

		Współczynnik wodno-mieszaninowy					
		w/m = 1,0			w/m = 0,8		
Nr próbki		I	II	III	IV	V	VI
Procentowy udział grafitu	%	0	10	30	0	10	30
Pomiar λ 1	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	3,92	3,98	4,36	3,76	4,33	4,93
Pomiar λ 2	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	3,61	3,75	4,34	3,74	4,23	5,39
Pomiar λ 3	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	3,44	3,74	3,65	3,76	4,21	5,35
Pomiar λ 4	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	3,32	3,74	3,42	3,75	4,11	5,33
Pomiar λ 5	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	3,55	3,86	4,01	3,78	4,28	5,15
Wartość średnia λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	3,57	3,81	3,96	3,76	4,23	5,23

Ostatnim wariantem badania było pokrycie próbki ogólnodostępnym środkiem powierzchniowo czynnym w celu zwiększenia przewodności cieplnej na kontakcie próbki i czujnika. Wyniki zestawiono w tabeli 10.

Tabela 10

Wyniki pomiarów przewodności cieplnej (λ) próbek zwilżonych środkiem powierzchniowo czynnym

		Współczynnik wodno-mieszaninowy					
		w/m = 1,0			w/m = 0,8		
Nr próbki		I	II	III	IV	V	VI
Procentowy udział grafitu	%	0	10	30	0	10	30
Pomiar λ 1	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	3,5	3,92	4,6	3,59	3,52	5,22
Pomiar λ 2	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	3,64	3,88	4,65	3,69	3,98	5,27
Pomiar λ 3	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	3,75	3,85	4,73	3,65	3,94	5,18
Pomiar λ 4	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	3,78	3,74	4,75	3,66	3,88	5,09
Pomiar λ 5	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	3,76	3,79	4,71	3,6	3,86	4,82
Wartość średnia λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	3,69	3,84	4,69	3,64	3,84	5,12

5. WNIOSKI

1. Jak można zauważyć, najmniejsze wartości współczynnika przewodności cieplnej uzyskano podczas pomiaru przy suchej powierzchni badanej próbki. Niska wartość badanego parametru wynika z niedokładnego przylegania próbki do czujnika. Uzyskano wartości zdecydowanie niższe od oczekiwanych.
2. Nawilżenie powierzchni próbki wodą powoduje lepszy kontakt między próbką a czujnikiem, co wpływa na wzrost współczynnika przewodności cieplnej. Jeszcze lepszy kontakt uzyskano, obciążając badaną próbkę masą jednego kilograma. W większości próbek spowodowało to wzrost badanego współczynnika przewodności cieplnej.
3. Najwyższą wartość przewodności cieplnej próbek uzyskano, gdy na kontakcie próbka – czujnik zastosowano środek powierzchniowo czynny (w tym celu użyto popularnego płynu do mycia naczyń). W przypadku wszystkich próbek o współczynniku wodno-mieszaninowym równym 1,0 spowodowało to zwiększenie badanego parametru w porównaniu z badaniem z obciążeniem. W próbkach o współczynniku w/m = 0,8 nie zaobserwowano wzrostu przewodności cieplnej. Najlepsze wyniki parametrów w tych próbkach uzyskano podczas badania z wilgotną powierzchnią styku oraz z obciążeniem.
4. Warto zauważyć, że żadne pomiary nie dały spodziewanych rezultatów, zgodnych z wynikami literaturowymi. Wartości pierwszego badania są zbyt niskie, co – jak już zauważono – wynika ze słabego kontaktu próbki z czujnikiem. Wartości uzyskane w pozostałych trzech badaniach przekraczają natomiast znacznie wartości oczekiwane. Było to spowodowane brakiem szczegółowego opracowania metodyki pomiaru urządzeniem TT-TCP-01 próbek cementowych.

LITERATURA

[1] Gonet A., Stryczek S., Śliwa T., Małolepszy J., Kotwica Ł.: *Środek do wypełniania zwłaszcza otworowych wymienników ciepła*. Zgłoszenie patentowe P.395 428, AGH, Kraków 2011.

[2] Pichór W.: *Właściwości termoelektryczne lekkich zapraw budowlanych z dodatkiem odpadowego grafitu.* Materiały Ceramiczne, t. 62, nr 2, 2010, s. 161–165.

[3] www.sinograf.com.pl (stan na dzień 1 lipca 2011).

[4] *Zasada działania przyrządu TT-TC-01 i instrukcja obsługi* (tłum. A. Złotkowski). AGH, Kraków 2009 (praca niepublikowana).

[5] PN-EN 196-1:2006: *Metody badania cementu. Część 1: Oznaczanie wytrzymałości.*

[6] PN-EN 197-1:2002: *Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*.

[7] PN-EN 197-2:2002: *Cement. Część 2: Ocena zgodności*.

[8] PN-EN ISO 10426-1. *Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 1: Specyfikacja*.

[9] PN-EN ISO 10426-2. *Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 2: Badania cementów wiertniczych*.