
PRACE

**Instytutu Ceramiki
i Materiałów Budowlanych**

Scientific Works
of Institute of Ceramics
and Building Materials

Nr 13

ISSN 1899-3230

Rok VI

Warszawa–Opole 2013

Teksty publikowane w „Pracach Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych” poddawane są procedurze recenzyjnej

Na okładce zdjęcie z artykułu Michała Stachów

„Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych” ukazują się w wersji papierowej i elektronicznej (<http://icimb.pl/opole/wydawnictwa>).
Wersją pierwotną jest wersja papierowa

Opracowanie redakcyjne: Maria Szwed, Janina Drozdowska



Wydawnictwo Instytut Śląski Sp. z o.o., Opole, ul. Piastowska 17, tel. 77 4540 123
e-mail: wydawnictwo@is.opole.pl
Nakład: 130 egz. Objętość: 5,50 ark. wyd., 6,75 ark. druk.

TAMARA MALINOWSKA*

Optimalizacja udziału spoiw w suchej masie ogniotrwałej

Słowa kluczowe: suche masy ogniotrwałe, spoiwa, obliczenia cieplne, metoda planowania doświadczeń, kadź stalownicza.

W pracy określono warunki cieplne stosowania suchych mas ogniotrwałych w obmurzu kadzi stalowniczych jako warstwy ochronnej. W oparciu o metodę planowania doświadczeń oceniono ilościowo wpływ wybranych spoiw na właściwość mas po wypaleniu. Temperatury wypalania próbek z mas ogniotrwałych przyjęto na podstawie przeprowadzonych obliczeń cieplnych w warunkach stacjonarnego przepływu ciepła. Przedstawiono wpływ: sumarycznego udziału spoiw (fosforanowego i boranowego) – czynnik X_1 oraz ich wzajemnego stosunku (czynnik X_2) na wytrzymałość na ściskanie (Y, A) próbek mas po wypaleniu. Wykazano, że maksymalne wartości wytrzymałości na ściskanie (67,5 MPa) uzyskuje się przy następujących wartościach czynników: $X_1 = 8\%$ mas. i $X_2 = 5$.

1. Wprowadzenie

Wykonanie obmurzy warstwy ochronnej kadzi stalowniczych z suchych mas ogniotrwałych zyskuje sobie coraz więcej zwolenników w krajowym hutnictwie żelaza i stali. Dotychczas w hutnictwie krajowym wykonuje się wyłożenie ochronne kadzi stalowniczych z tradycyjnych wyrobów szamotowych łączonych zaprawą ogniotrwałą. Trwałość tak wykonanego wyłożenia kadzi wynosi 3–4 kampanie, tzn. 3–4 wyburzenia warstwy roboczej kadzi. Natomiast przy stosowaniu monolitycznej warstwy ochronnej wykonywanej z suchych mas ogniotrwałych, trwałość ta jest kilkakrotnie wyższa i wynosi ok. 20 kampanii kadzi.

Wykonanie obmurzy warstwy ochronnej kadzi stalowniczych z suchych mas ogniotrwałych niesie za sobą bezsporne korzyści, jakie może osiągnąć ich użytkownik. Do nich należą:

– krótszy czas wykonania obmurzy,

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

- możliwość wykonania bezspoinowych obmurzy monolitycznych warstwy ochronnej,
- znaczące, wymierne oszczędności energii cieplnej i nakładów na robociznę.

Suche masy ogniotrwałe należą do materiałów nieformowanych i są stosowane w stanie niewypalonym bezpośrednio między warstwą roboczą a włóknistą warstwą izolacyjną pancerza kadzi stalowniczych. Masy te pod działaniem niewielkiej siły użytej do formowania przybierają żądany kształt, a trwałą strukturę ceramiczną uzyskują w czasie wstępnego nagrzewania i późniejszej eksploatacji kadzi. Suche masy ogniotrwałe stosuje się w celu ochrony pancerza stalowego kadzi przed przedarciem się ciekłej stali przez warstwą roboczą kadzi stalowniczej w wyniku miejscowego, doraźnego jej zużycia.

Jednym z czynników decydujących o specyficznych właściwościach mas ogniotrwałych są stosowane przy ich produkcji substancje wiążące. Suche masy ogniotrwałe wiązane są chemicznie i twardnieją wraz ze wzrostem temperatury. W przypadku tych mas stosowane spoiwa decydują również o najważniejszych parametrach użytkowych, m.in. o skurczliwości, wytrzymałości i ogniotrwałości. Z tego powodu kwestia optymalnego zarówno pod względem ilościowym, jak i jakościowym doboru środków wiążących jest rzeczą szczególnie ważną. Rodzaj zastosowanej substancji wiążącej odgrywa istotną rolę w przypadku suchych mas ogniotrwałych stosowanych w wykonawstwie warstwy ochronnej kadzi stalowniczych, gdyż niewielka ilość spoiwa musi zapewnić powstanie wiązania i uzyskanie trwałej struktury ceramicznej w czasie eksploatacji kadzi.

Najobszerniejszą i najbardziej różnorodną grupę stosowanych obecnie substancji wiążących w suchych masach ogniotrwałych stanowią spoiwa nieorganiczne. Najczęściej stosowanymi spoiwami nieorganicznym są związki fosforu, siarczany glinu i magnezu oraz związki boru [1].

Celem pracy jest ocena wpływu udziału spoiw – fosforanowego i boranowego – na właściwości mas glinokrzemianowych stosowanych w ustalonych warunkach cieplnych w obmurzu kadzi stalowniczych. W pracy zastosowano mieszaninę dwóch spoiw, ze względu na dobre właściwości wiążące – spoiwo fosforanowe oraz spoiwo boranowe ze względu na obniżenie temperatury spiekania suchej masy ogniotrwałej w wymurówce kadzi stalowniczej [1].

2. Metodyka badań i obliczeń

2.1. Rozkład temperatury w wymurówce kadzi stalowniczej w warunkach stacjonarnego przepływu ciepła

Dla prawidłowego doboru granicznych temperatur stosowania mas ogniotrwałych w obmurzu kadzi stalowniczej niezbędne jest wykonanie obliczeń cieplnych.

W oparciu o znajomość procesów stalowniczych wykonano obliczenia rozkładu temperatury w wielowarstwowej wymurówce kadzi stalowniczej w warunkach stacjonarnego przepływu ciepła. Obliczenia rozkładu temperatury i strumienia ciepła przenikającego przez wymurówkę wykonano dla stanu równowagi przy wykorzystaniu programu komputerowego, którego podstawą jest metodyka W. Heiligenstaedta [2]. Obliczenia wykonano dla wymurówki kadzi stalowniczej o pojemności 75 ton stali, eksploatowanej w jednej z polskich hut. Podstawę stosowanego programu komputerowego stanowi wzór na strumień ciepła (1).

$$Q = a \frac{tw - to}{\sum \frac{s}{\lambda}} \quad (1)$$

gdzie:

Q [W/m²] – strumień ciepła,

a [b.w] – współczynnik Heiligenstaedta. Wartość tabelaryczna $a = f(\sum \frac{s}{\lambda}, tw)$ [2],

tw [°C] – temperatura robocza,

to [°C] – temperatura otoczenia,

s [mm] – grubość materiału,

λ [W/mK] – współczynnik przewodnictwa cieplnego materiału.

2.2. Przygotowanie próbek do badań

W oparciu o przeprowadzone obliczenia cieplne i znajomość warunków procesu dokonano wyboru surowców i zoptymalizowano uziarnienie masy, w której maksymalna średnica ziaren wynosiła 6 mm. Do otrzymania suchych mas ogniotrwałych na bazie wytypowanych surowców, zastosowano spoiwo fosforanowe i spoiwo boranowe [3].

W celu przygotowania poszczególnych mas do badań, w pierwszej kolejności do pyłu dodawano odpowiednią ilość spoiw w stanie stałym, których ilości zoptymalizowano w oparciu o metodę statystyczną planowania eksperymentu. Następnie pył wraz z mieszaniną spoiw (fosforanowego i boranowego) mielono w młynie przez ok. 30 min. Po dokładnym zmieleniu dodawano frakcje grubsze ziarna i całość mieszano. Uzyskany skład masy był zgodny z planem eksperymentu. Metodą prasowania jednoosiowego przy ciśnieniu 30 MPa zformowano walce o wymiarach $h = \varnothing = 50$ mm. Następnie otrzymane próbki suszono w 200°C/24 h i wypalano w 850°C i 1300°C z przetrzymaniem w zadanej temperaturze przez 2 godziny. Temperaturę wypalania dobrano na podstawie przeprowadzonych obliczeń cieplnych. Przeprowadzono badania podstawowych właściwości otrzymanych wyrobów: skurczliwości liniowej suszenia i wypalania poprzez bezpośredni pomiar wysokości i średnicy próbek, gęstości pozornej

i porowatości otwartej wg PN-EN 993-1: 1998, wytrzymałości na ściskanie oraz ogniotrwałości zwykłej wg PN-EN 993-12: 2000 [3]. Pomiar wytrzymałości na ściskanie wykonano trzykrotnie dla każdej z prób po wypaleniu w 850°C i 1300°C. Badanie wytrzymałości na ściskanie próbek przeprowadzono zgodnie z procedurą podaną w PN-EN 993-5: 2001.

2.3. Sformułowanie problemu i wybór planu eksperymentu badawczego

Wytrzymałość na ściskanie po wypaleniu mas ogniotrwałych f_c , zgodnie z przyjętym celem eksperymentu, postanowiono zbadać w zależności od: sumarycznego udziału dodatku spoiw – fosforanowego P_1 i boranowego P_2 w suchej masie ogniotrwałej (czynnik X_1) oraz stosunku tych spoiw: fosforanowego P_1 do boranowego P_2 (czynnik X_2).

Badanie przeprowadzono zgodnie z metodami statystycznego planowania eksperymentu [4–5]. Według tych metod został uzasadniony wybór zakresów zmienności oraz poziomów czynników. Każdy z czynników rozpatrywano na trzech poziomach zmienności – niższym, podstawowym i wyższym. Zakresy zmienności oraz poziomy czynników podano w tabeli 1.

T a b e l a 1

Zakresy zmienności rozpatrywanych czynników X_1 i X_2

Czynniki zmienne	Poziom zmienności		
	-1	0	+1,0
Sumaryczny udział spoiw $X_1 (P_1 + P_2)$ [% mas.]	5,0	6,5	8,0
Stosunek udziałów spoiw $X_2 (P_1/P_2)$	0,5	1,0	1,5

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Przyjęto, że sumaryczny udział spoiw powinien mieścić się w przedziale 5–8%, a ich całkowita wartość nie powinna przekraczać 8%. Dalszy wzrost udziału spoiw może obniżyć ich właściwości ogniowe. Przedział wartości zmiennej X_2 wynosił 0,5–1,5.

Jako wielkości mierzone stanowiące funkcje odpowiedzi: Y , A i B przyjęto odpowiednio:

Y – wytrzymałość na ściskanie materiałów po wypaleniu w 850°C/2 h, MPa,

A – wytrzymałość na ściskanie materiałów po wypaleniu w 1300°C/2 h, MPa,

B – wartość iloczynu:

$$B = (W_i^{850} - 25)(W_i^{1300} - 50) \quad (2)$$

opisującego zależność między uzyskanymi wartościami wytrzymałości na ściskanie materiałów po wypaleniu w 850°C i 1300°C, gdzie W_i to uzyskana wytrzymałość na ściskanie materiałów po wypaleniu dla i -tego pomiaru.

Przyjęto założenie, że minimalna wytrzymałość na ściskanie materiałów po wypaleniu w $850^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ powinna wynosić 25 MPa, a w $1300^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ – 50 MPa.

Temperaturę wypalania badanych próbek z suchych mas ogniotrwałych dobrano na podstawie przeprowadzonych obliczeń cieplnych. Uzyskana temperatura wypalania stanowi graniczną temperaturę pracy masy ogniotrwałej w obmurzu kadzi stalowniczej.

Do opisu czynnиковego $Y, A, B = f(X_1, X_2)$ została wybrana postać funkcji (3), współczynniki której należało obliczyć z macierzy planowania:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_{12} X_1 X_2 \quad (3)$$

gdzie:

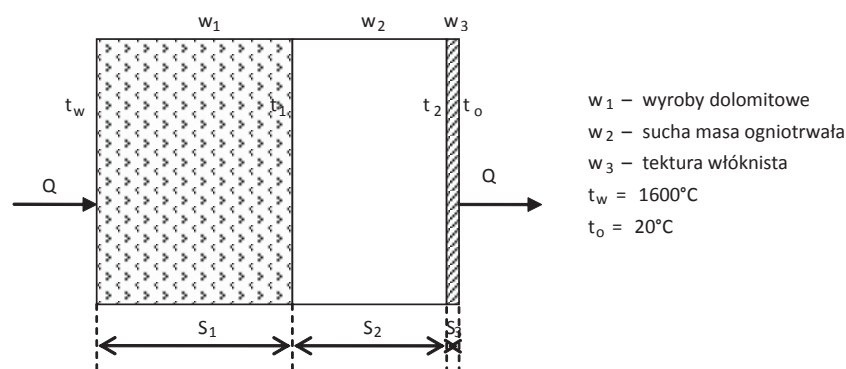
X_1 i X_2 są zmiennymi (zgodnie z tab. 1),

a_0, a_1, a_2, a_{12} są natomiast współczynnikami równania regresji.

3. Wyniki badań i obliczeń oraz ich omówienie

3.1. Wyniki obliczeń cieplnych

Schemat wymurówki poddanej analizie wraz z jej opisem przedstawiono na rysunku 1. Warstwę roboczą wymurówki, zarówno w przypadku ścian bocznych, jak i dna, stanowiły wyroby dolomitowe niewypalane, wiązane smołą, o zawartości MgO – 36% i CaO – 57%. Z kolei warstwę izolacyjną-ochronną stanowiły sucha masa ogniotrwała (wysokoglinowa o zawartości Al_2O_3 ok. 80%) i przylegająca do pancerza tektura włóknista. Obliczenia wykonano dla początkowej grubości warstwy roboczej kadzi oraz dla 75% początkowej grubości warstwy roboczej, wynikającej z dalszej eksploatacji kadzi. Uzyskane wyniki obliczeń cieplnych przedstawiono w tabelach 2 i 3.



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 1. Schemat wymurówki kadzi stalowniczej

T a b e l a 2

Wyniki obliczeń cieplnych dla początkowej grubości warstwy roboczej kadzi stalowniczej

Nr warstwy	Materiał warstwy	Grubość warstwy [mm]	Współczynnik przewodnic-twa cieplnego [W/m·K]	Opór cieplny warstwy [m ² ·K/W]	Temperatura na końcu warstwy [°C]
w ₁	wyroby dolomitowe	127	4,00	0,0318	1 326
w ₂	sucha masa ogniotrwała	100	1,70	0,0588	820
w ₃	tektura włóknista	8	0,15	0,0533	361

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

T a b e l a 3

Wyniki obliczeń cieplnych dla 75% początkowej grubości warstwy roboczej kadzi stalowniczej

Nr warstwy	Materiał warstwy	Grubość warstwy [mm]	Współczynnik przewodnic-twa cieplnego [W/m·K]	Opór cieplny warstwy [m ² ·K/W]	Temperatura na końcu warstwy [°C]
w ₁	wyroby dolomito- towe	95	4,00	0,0237	1 386
w ₂	sucha masa ogniotrwała	100	1,70	0,0588	855
w ₃	tektura włóknista	8	0,15	0,0533	373

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Na podstawie wykonanych obliczeń cieplnych określono temperaturę na końcu każdej z warstw. Graniczna temperatura stosowania przedmiotowej masy ogniotrwałej (o zawartości Al₂O₃ ok. 80%) to 1326°C i 820°C dla początkowej grubości warstwy roboczej wykonanej z wyrobów dolomitowych oraz 1386°C i 855°C dla 75% początkowej grubości warstwy roboczej. Na podstawie uzyskanej temperatury na końcach warstwy ochronnej dobrano metodykę badania mas, w szczególności temperaturę wypalania, odpowiednio – 1300°C i 850°C.

3.2. Wyniki obliczeń udziału spoiw w masie

Wybrany, uproszczony plan eksperymentu wymaga przeprowadzenia małej liczby pomiarów – jedynie dla dwóch zmiennych (każdy na poziomie wyższym i niższym) zawierający $N = 4$ próby (tab. 4). W każdej próbie przyjęto powtarne pomiary na 3 próbkach. Dla porównania wpływu udziału poszczególnych spoiw na właściwości wytrzymałościowe mas po wypaleniu, dodatkowo przeprowadzono badania uwzględniające wartość poziomu podstawowego (poziom 0).

T a b e l a 4

Wyniki obliczeń udziału spoiw w masie

Numer pomiaru	Sumaryczny udział spoiw [% mas.]	Stosunek udziałów spoiw
	X_1	X_2
0	6,5	1,0
1	5,0	0,5
2	8,0	0,5
3	5,0	1,5
4	8,0	1,5

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Właściwości otrzymanych mas ogniotrwałych w zależności od udziału spoiwa w masie zamieszczono w tabeli 5. Uzyskane wyniki są wartościami średnimi z trzech pomiarów.

T a b e l a 5

Właściwości mas zawierających spoiwa w ilościach wynikających z macierzy planowania (tab. 4)

Numer pomiaru	Temperatura [°C]	Zmiany liniowe [%]		Porowatość otwarta [%]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Ogniotrwałość zwykła [°C]
		h	ø				
0	200	+0,35	+0,30	-	-	-	> 1 700
	850	+0,35	+0,50	27,5	2,45	19,4	
	1 300	-0,05	0,00	26,6	2,50	43,8	
1	200	+0,45	+0,30	-	-	-	> 1 770
	850	+0,05	+0,10	26,9	2,50	27,1	
	1 300	+0,05	+0,30	27,3	2,49	42,6	
2	200	+0,45	+0,30	-	-	-	> 1 770
	850	+0,10	+0,25	28,5	2,41	33,8	
	1 300	+0,40	+0,65	28,4	2,39	36,1	
3	200	+0,30	+0,30	-	-	-	> 1 770
	850	+0,15	+0,20	27,0	2,52	22,7	
	1 300	-1,05	-0,60	24,7	2,59	61,9	
4	200	+0,40	+0,30	-	-	-	> 1 700
	850	+0,30	+0,40	26,4	2,46	35,1	
	1 300	-0,95	-0,70	25,0	2,54	57,5	

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Na podstawie wyników eksperymentu otrzymano następujące równania funkcji odpowiedzi:

$$\text{– dla } 850^{\circ}\text{C}/2 \text{ h} \quad Y = 29,7 + 4,8X_1 - 0,8X_2 + 1,4X_1X_2 \quad (4)$$

$$\text{– dla } 1300^{\circ}\text{C}/2 \text{ h} \quad A = 49,5 - 2,7X_1 + 10,2X_2 + 0,5X_1X_2 \quad (5)$$

$$B = -22,3 - 1,1X_1 + 46,7X_2 + 52,6X_1X_2 \quad (6)$$

Współczynniki regresji obliczono sumując uzyskane wartości wytrzymałości na ściskanie mas ogniotrwałych po wypaleniu w 850°C i 1300°C (tab. 5), zachowując znaki (+, -) zgodnie z macierzą planowania, następnie wynik podzielono przez liczbę pomiarów [5].

Na podstawie uzyskanych równań regresji (4–6) oceniono charakter i stopień wpływu rozpatrywanych czynników. Okazało się, że największy wpływ na wytrzymałość na ściskanie po wypaleniu w 1300°C badanej masy ogniotrwałej wykazuje czynnik X_2 – stosunek udziału spoiw: fosforanowego do boranowego. Analizując uzyskane równania można stwierdzić, że zwiększenie udziału spoiw (X_1) nie będzie silnie oddziaływać na wzrost wartości wytrzymałości na ściskanie materiałów po wypaleniu w 1300°C . Jednak może wpłynąć na wzrost wytrzymałości materiałów po wypaleniu w 850°C . Biorąc pod uwagę proces eksploatacji kadzi i panujące w niej warunki cieplne, można przyjąć, że temperatura 1300°C stanowi temperaturę pracy warstwy ochronnej obmurza kadzi stalowniczych. Dlatego uzyskana wartość wytrzymałości na ściskanie po wypaleniu w 1300°C stanowi wartość kluczową przy doborze suchych mas ogniotrwałych.

Zwiększenie udziału spoiwa fosforanowego w stosunku do spoiwa boranowego (X_2) może silnie wpływać na wzrost wytrzymałości na ściskanie materiałów po wypaleniu w 1300°C . Dla wartości Y (wytrzymałość na ściskanie materiałów po wypaleniu w 850°C) uzyskano niską wartość zmiennej X_2 , którą prawdopodobnie można było pominąć w dalszej analizie, nie zmieniając istotności pozostałych współczynników. Równanie B również wskazuje na silne oddziaływanie stosunku udziału spoiwa fosforanowego do boranowego. Dlatego w dalszej części eksperymentu zmieniono jedynie stosunek poszczególnych spoiw, a ich sumaryczny udział dla każdej z badanej próbki pozostawiono bez zmian i wynosił on 8% mas. w stosunku do suchej masy ogniotrwałej.

Rozpatrując ilościowy wpływ zastosowanych spoiw stwierdzono, że większy udział spoiwa w masie (8%) zapewni uzyskanie lepszych właściwości wytrzymałościowych tworzyw po wypaleniu (tab. 5). Zmiana udziału spoiw nie wpłynęła na wartości ogniotrwałości zwykłej badanych mas. Dla każdej z badanych prób uzyskano ogniotrwałość zwykłą powyżej 1700°C .

W kolejnej części eksperymentu w celu ostatecznego doboru udziału spoiw w masie zmieniono jedynie zmienną X_2 (stosunek spoiwa fosforanowego do spo-

iwa boranowego), a ich sumaryczny udział w masie pozostawiono bez zmian i dla każdego z pomiarów wynosił on 8% mas. (tab. 6).

T a b e l a 6

Wyniki obliczeń udziału spoiw w masie

Numer pomiaru	Stosunek udziałów spoiw X_2	
	spoiwo fosforanowe [% mas.]	spoiwo boranowe [% mas.]
5	5,3	2,7
6	6,0	2,0
7	6,4	1,6
8	6,7	1,3

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

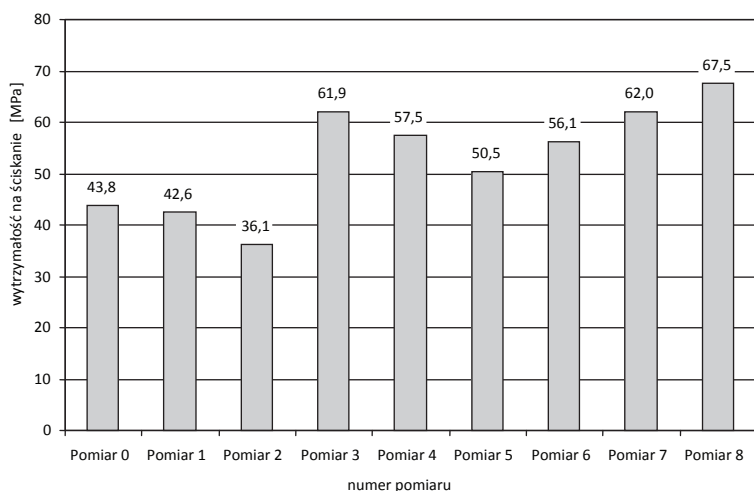
Próbki do badań przygotowywano w ten sam sposób jak próbki dla wcześniejszych pomiarów (0–4). Wyniki przeprowadzonych badań zamieszczono w tabeli 7 oraz na rycinie 2.

T a b e l a 7

Podstawowe właściwości masy ogniotrwalej w zależności od proporcji spoiw

Numer pomiaru	Temperatura [°C]	Zmiany liniowe [%]		Porowatość otwarta [%]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Wytrzymałość na ścislenie [MPa]
		h	Ø			
5	850	+0,80	+0,70	25,4	2,52	37,3
	1 300	-0,95	-0,45	23,2	2,61	50,5
6	850	+0,25	+0,35	24,9	2,54	48,4
	1 300	-1,50	-1,00	21,7	2,66	56,1
7	850	+0,30	+0,40	23,8	2,55	47,3
	1 300	-1,50	-1,05	21,6	2,65	62,0
8	850	+0,05	+0,15	23,5	2,56	39,1
	1 300	-1,25	-0,85	20,8	2,68	67,5

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 2. Wytrzymałość na ściskanie materiałów po wypaleniu w $1300^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ w zależności od udziału spoiw: fosforanowego i boranowego

Generalnie, wszystkie otrzymane materiały wykazywały właściwości lepsze w porównaniu do prób uzyskiwanych w trakcie wcześniejszych pomiarów. Dla wszystkich prób (pomiar 5–8) uzyskano wyższą wytrzymałość na ściskanie po wypaleniu w $850^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$, której wartość przekraczała 37 MPa. Spośród otrzymanych tworzyw stosunkowo dobre właściwości zaobserwowano dla pomiaru 7. Materiał ten charakteryzował się dość niską skurczliwością wypalania, większą gęstością pozorną i większą wytrzymałością na ściskanie po wypaleniu w 850°C i $1300^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ (odpowiednio $2,65\text{ g/cm}^3$; 47,3 MPa i 62,0 MPa) oraz małą porowatością otwartą (21,6%). Najlepszą wytrzymałość na ściskanie po wypaleniu w $1300^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ uzyskano dla pomiaru 8 – 67,5 MPa, jednak po wypaleniu w $850^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ materiał ten osiągnął mniejszą wytrzymałość o ok. 8 MPa w porównaniu do próbki pomiaru 7.

Z przeprowadzonych badań wynika, że duży wpływ na właściwości otrzymanych materiałów miał udział spoiw w masie. Jak wykazano wcześniej, odpowiedni dobór ilościowy spoiw zapewnia lepszą spiekalność materiałów, a tym samym poprawę ich właściwości po wypaleniu. Przy większym udziale spoiw (8%) i znacznym podwyższeniu stosunku spoiwa fosforanowego do spoiwa boranowego (6,7%:1,3%) w masie ogniotrwałej rosła jej wytrzymałość na ściskanie po wypaleniu w $1300^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ (ryc. 2).

4. Podsumowanie

W oparciu o przeprowadzone obliczenia cieplne w warunkach stacjonarnego przepływu ciepła określono graniczną temperaturę stosowania suchych mas ogniotrwałych w warstwie ochronnej wymurówki kadzi stalowniczych.

Analiza przeprowadzonego planu eksperymentu pozwala na sformułowanie wniosków dotyczących udziału poszczególnych spoiw w kształtowaniu właściwości badanych mas ogniotrwałych. Wytrzymałości na ściskanie próbek mas badano w zależności od dwóch czynników (sumarycznego udziału spoiw oraz ich stosunku). Największy wpływ na wytrzymałość na ściskanie mas ogniotrwałych po wypaleniu wykazuje czynnik X_2 – stosunek udziału spoiwa fosforanowego i spoiwa boranowego. Przy wzroście tego czynnika wytrzymałość na ściskanie mas po wypaleniu w 1300°C wzrosła o 87% w porównaniu do uzyskanej wartości dla niższego poziomu zmienności ($X_2 = 0,5$). Zwiększenie udziału spoiw z 5% do 8% mas. wpływa na wzrost wytrzymałości na ściskanie mas po wypaleniu w 850°C. Natomiast po wypaleniu w 1300°C próbek zawierających 8% mas. spoiwa wytrzymałość osiągnęła maksymalną wartość równą 67,5 MPa przy stosunku udziału spoiw równym 5.

Literatura

- [1] W o j s a J., *Zasadowe materiały ogniotrwałe nieformowane*, Instytut Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych, Oddział Materiałów Ogniotrwałych w Gliwicach, Gliwice 2009.
- [2] H e i l i g e n s t a e d t W., *Obliczenia cieplne pieców przemysłowych*, Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1952.
- [3] M a l i n o w s k a T., B a r a ń s k i J., W o j s a J., C z e c h o w s k i J., Badania nad opracowaniem technologii suchej masy ogniotrwałej stosowanej na wykonawstwo warstwy izolacyjnej („futrówki”) kadzi stalowniczych, sprawozdanie nr 3741/2N020S12/BT/2012, niepublikowane.
- [4] G o d z i s z e w s k i J., M a n i a R., P a m p u c h R., *Zasady planowania doświadczeń i opracowania wyników pomiarów*, AGH, Kraków 1982.
- [5] W o j s a J., *O metodzie planowania doświadczeń – praktycznie*, Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddział Materiałów Ogniotrwałych w Gliwicach, Gliwice 2012.

TAMARA MALINOWSKA

OPTIMIZATION OF BINDER CONTENT IN THE REFRACTORY DRY MIX

Keywords: refractory dry mixes, binder, thermal calculations, experimental design method, steel ladle.

In this paper the thermal conditions of the refractory mixes, using as a protective layer of steel ladles, were defined. Based on the experimental design method, the influence of selected binder on the property of the mixes after firing was quantified. Firing temperature of the samples of refractory mixes was derived from the thermal calculations under conditions of steady thermal flow. The influence of the total binder content (phosphate and borate) – factor X_1 , and their ratio (factor X_2) on the compressive strength (Y , A) of the fired samples were presented. It was found that the maximum value of the compressive strength (67,5 MPa) was obtained at the following factors: $X_1 = 8\%wt.$ and $X_2 = 5$.