

## Badania procesu zagęszczania i własności spiekanej pod ciśnieniem ceramiki korundowej – $\text{Al}_2\text{O}_3$

Zgodnie z aktualnymi potrzebami techniki, nauka współczesna poświęca wiele uwagi nowym materiałom. Badania zmierzają zarówno do ustalenia najkorzystniejszych składów, jak i opracowania nowych i udoskonalenia istniejących metod wytwarzania i przetwarzania.

Przez określenie "przetwarzanie" należy rozumieć te zabiegi, w wyniku których otrzymuje się materiał o żądanych własnościach.

Specyficzne, a zarazem bardzo korzystne dla współczesnej techniki walory użytkowe, reprezentują materiały ceramiczne. Wśród nich czołowe miejsce zajmuje ceramika korundowa  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Duża wytrzymałość mechaniczna, korzystne własności cieplne i bardzo dobre parametry elektryczne, obok innych zalet, umożliwiają budowę wielu maszyn, urządzeń i aparatów, których nie można wykonywać przy użyciu innych materiałów. Ze względu na odporność termiczną wyroby z  $\text{Al}_2\text{O}_3$  znajdują zastosowanie w urządzeniach narażonych na działanie wysokich temperatur, a więc jako wykładziny pieców i urządzeń termicznych, komory pieców wysokotemperaturowych, osłony termopar pracujących w wysokich temperaturach, łódki i kasety do topienia materiałów, łopatki turbin gazowych, osłony rakiet itp.

Dobra przewodność cieplna, w połączeniu z wytrzymałością mechaniczną i odpornością na ścieranie w wysokich temperaturach, zdecydowały o zastosowaniu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  jako elementów narzędzi skrawających, pracujących również w wysokich temperaturach. Brak aktywności chemicznej w wysokich temperaturach, umożliwia zastosowanie  $\text{Al}_2\text{O}_3$  w aparaturze chemicznej narażonej na działanie agresywnych czynników w podwyższonych temperaturach.

Odporność na działanie promieniowania czyni  $\text{Al}_2\text{O}_3$  cennym materiałem w budowie reaktorów, a odporność na działanie par cezu umożliwia zastosowanie go w budowie przetworników termojonowych, stanowiących źródła energii pojazdów kosmicznych.

Oto niektóre tylko z wielu możliwych zastosowań  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Szczególną rolę odgrywa  $\text{Al}_2\text{O}_3$  we współczesnej elektronice, gdzie jest wykorzystywany jako doskonały izolator elektryczny, dobry przewodnik ciepła, mechanicznie wytrzymały materiał konstrukcyjny, chemicznie neutralny w procesach obróbki ter-

micznej /nawet powyżej 1000°C/, o korzystnych własnościach dielektrycznych.

Rozwijające się badania  $Al_2O_3$ , szczególnie z zastosowaniem domieszek, wskazują na możliwość uzyskania innych, cennych własności, jak selektywnej przepuszczalności promieniowania / w tym również światła widzialnego/, jednokierunkowego lub określonego przewodzenia. itp.

Własności tworzywa korundowego o zawartości 99,5%  $Al_2O_3$  przedstawiono w tabl. 1.

Tablica 1

Własności tworzywa korundowego o zawartości 99,5%  $Al_2O_3$  /Alsimag 772 - American Lava Corporation/. Drobnodziarniste tworzywo o dużej gęstości.

Lp.	Określenie	Symbol	Jednostka	Wartość	
1	Nasiąkliwość wodą	-	%	0,0	
2	Gęstość	g	g/cm <sup>3</sup>	3,89	
3	Twardość	H	wg Mohs'a Rockwell 45 N	9 80	
4	Liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej	$\alpha$	1/°C 25-300°C 25-700°C 25-900°C	6,6 · 10 <sup>-6</sup> 7,4 · 10 <sup>-6</sup> 7,7 · 10 <sup>-6</sup>	
5	Wytrzymałość na zginanie	$\sigma_g$	kG/cm <sup>2</sup>	≥4920	
6	Moduł sprężystości	$\epsilon$	kG/cm <sup>2</sup> · 10 <sup>6</sup>	3,87	
7	Przewodność cieplna	C	cal/cm·sek °C	25 300 500 800	≥0,0880 ≥0,0450 ≥0,0280 ≥0,0210
8	Wytrzymałość dielektryczna	W	kV/mm	≥8,7	
9	Oporność skrośna	R	Ω·cm 25°C 100 300 500	≥10 <sup>14</sup> ≥7,3 · 10 <sup>13</sup> ≥8,6 · 10 <sup>11</sup> ≥3,1 · 10 <sup>10</sup>	
10	Stała dielektryczna	$\alpha$	1 MHz 25°C	9,9	

Szerokie zastosowanie  $Al_2O_3$ , z pełnym wykorzystaniem jego walorów użytkowych, będzie możliwe po udoskonaleniu obecnie stosowanych i opracowaniu doskonalszych technologii.

Temperatura topnienia  $Al_2O_3$  wynosi 2050°C, wytwarzanie wyrobów z tego tworzywa oparto więc przede wszystkim na technologii spiekania. Bez zastosowania innych czynników technologicznych, poza ciepłem, uzyskiwanie w procesie spiekania gęstości

zbliżonej do teoretycznej dla tego materiału, wymaga temperatury ok. 1800°C/ również Alsimag 772/. Przy niższych temperaturach uzyskuje się niższe gęstości i mniej korzystne własności użytkowe. Spiekaniu w wysokich temperaturach towarzyszy proces rekryształizacji wtórnej, którego efektem jest rozrost ziaren oraz pogorszenie niektórych własności /szczególnie wytrzymałości mechanicznej/.

Zarysował się przeto problem opracowania takiej technologii, która umożliwiłaby uzyskanie w niższych temperaturach gęstości zbliżonych do teoretycznej, w których efekt rozrostu ziaren jest mniejszy. Rozpoczęto prace nad uaktywnianiem procesu spiekania, zarówno za pomocą metod chemicznych, jak i fizycznych. Wprowadzanie domieszek skutecznie obniża temperaturę spiekania, lecz z reguły obniża równocześnie walory użytkowe wyrobów. Z metod fizycznych zastosowano działanie promieniowania o dużej energii, pola magnetycznego i elektrycznego, drgań ultradźwiękowych itp.

Duże nadzieje wiąże się z tzw. spiekaniem pod ciśnieniem, zwanym również gorącym prasowaniem, w którym czynnikiem aktywującym obok temperatury jest ciśnienie. Spiekanie pod ciśnieniem wyrobów korundowych jest obecnie stosowane na świecie na skalę półtechniczną, a w Polsce nie stosuje się go wcale.

Włączenie ciśnienia jako czynnika technologicznego pozwoliło osiągnąć tą samą gęstość, co w spiekaniu tradycyjnym, w temperaturach ok. 400°C niższych. Badania wykazały również możliwość ograniczenia lub uniknięcia procesu rekryształizacji, a tym samym sterowania struktury wyrobów w tym procesie.

W badaniach podstawowych nad spiekaniem wiele uwagi poświęcono mechanizmom zagęszczania. Badania te są prowadzone nadal i w chwili obecnej nie ma jeszcze pełnej zgodności co do mechanizmu dominującego w procesie przeniesienia masy i zagęszczania. Opracowane w wyniku badań modele stosunkowo dobrze pokrywają się z danymi eksperymentalnymi, ale tylko w określonych obszarach.

Rozwój prac nad urządzeniami do spiekania pod ciśnieniem doprowadził do wielu ciekawych rozwiązań, stosowanych w pewnym zakresie w warunkach przemysłowych. Wiele problemów konstrukcyjnych czeka jednak nadal na rozwiązanie; dotyczy to szczególnie form do spiekania pod ciśnieniem.

Badania nad wyrobami spiekany wykazały, że ich własności użytkowe rosną proporcjonalnie do gęstości. Z rozważań teoretycznych wynika, że między własnościami mechanicznymi, cieplnymi i elektrycznymi, a gęstością zachodzi zależność prostoliniowa. Próby i badania technologiczne zmierzają więc do uzyskiwania materiałów o możliwie dużej gęstości. Temu samemu celowi są podporządkowane prace nad konstrukcją urządzeń i form do spiekania pod ciśnieniem.

O przebiegu i końcowym efekcie zagęszczania decyduje bardzo wiele różnych czynników, jak chemiczny i fazowy skład proszku, wielkość ziaren i ich aktywność powierzchniowa i strukturalna, termodynamiczny stan proszku po załadunku do formy, oddziaływanie temperatury i ciśnienia w czasie, rodzaj atmosfery w komorze roboczej, rodzaj materiału formy, jej kształt i stan powierzchni i inne. Czynniki te mają wpływ na gęstość spiekane go proszku, ale decydują równocześnie o strukturze i teksturze wyrobu uzyskanego w procesie spiekania pod ciśnieniem.

Z tego faktu wynika wniosek, że różnym warunkom technologicznym towarzyszą różne oddziaływania na spiekany proszek. Musi to prowadzić do odchyień w modelu liniowej zależności własności użytkowych spiekane go proszku od gęstości.

Podając wyniki badań nad procesem zagęszczania oraz własności uzyskanego materiału, trzeba dokładnie opisać wyżej wymienione czynniki. W przeciwnym przypadku wyniki te nie mają większej wartości użytkowej, bowiem powtórzenie prób jest niemożliwe, a wyniki mogą być zupełnie różne.

Informacje o warunkach spiekania i własnościach spiekane pod ciśnieniem  $Al_2O_3$  są w istniejących publikacjach z reguły niekompletne. W jednych jest brak danych o stosowanej aparaturze i parametrach spiekania, w innych nie podaje się własności spiekane pod ciśnieniem  $Al_2O_3$ .

Mimo stosunkowo obszernej literatury na temat spiekania pod ciśnieniem, można stwierdzić, że dla  $Al_2O_3$  nie wypracowano konkretnych danych wiążących równocześnie wiele własności materiału z warunkami technologicznymi, w jakich był spiekany.

Nie określono również jednoznacznie zależności między gęstością spiekane pod ciśnieniem  $Al_2O_3$ , a jego własnościami, określając w tym przypadku jedynie tendencje.

W tej sytuacji postanowiono:

- opracować i wykonać urządzenie do spiekania pod ciśnieniem,
- przeprowadzić odpowiednie próby i wytypować najkorzystniejszą formę do spiekania pod ciśnieniem,
- przeprowadzić próby i wytypować najwłaściwszy surowiec  $Al_2O_3$  do takiego spiekania,
- opracować technologię spiekania pod ciśnieniem, która umożliwiłaby uzyskanie dowolnej gęstości  $Al_2O_3$  /od gęstości wstępnego sprasowania na zimno do gęstości bliskiej teoretycznej/,
- zbadać i określić zależności między gęstością a wybranymi własnościami spiekane pod ciśnieniem  $Al_2O_3$  dla opracowanej technologii.

Jako cel badawczy przyjęto:

- ustalenie rzeczywistego charakteru zależności między gęstością a właściwościami spiekane  $Al_2O_3$ ,
- wykazanie, że zależności te nie mają w rzeczywistych warunkach spiekania charakteru prostoliniowego,
- określenie przyczyn wpływających na odchylenia od zależności prostoliniowej.

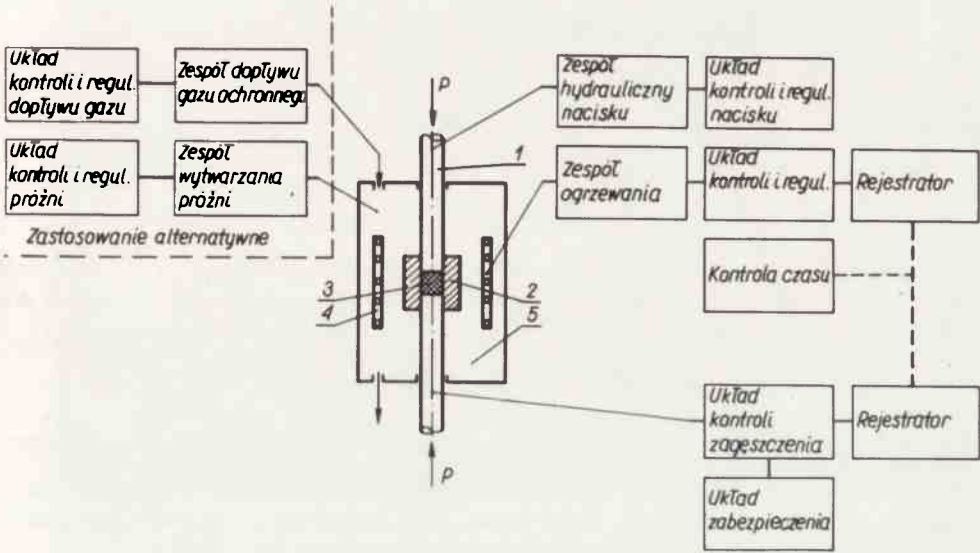
Praca umożliwi konstruowanie urządzeń technologicznych do spiekania pod ciśnieniem i projektowanie procesów technologicznych pod kątem uzyskiwania ceramiki korundowej o żądanych własnościach.

Praca to jest przyczynkiem do wprowadzenia w przemyśle polskim technologii spiekania pod ciśnieniem wyrobów korundowych.

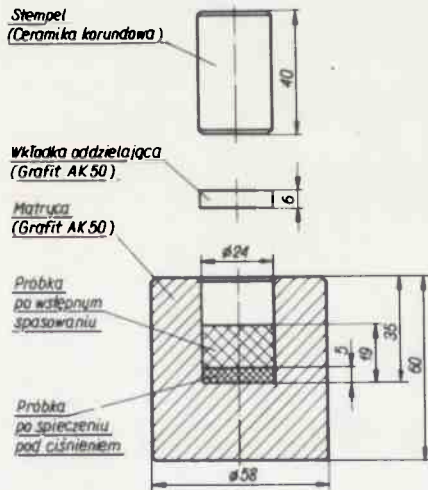
Z kilku znanych odmian spiekania pod ciśnieniem, wybrano spiekanie z naciskiem jednoosiowym jako najprostsze i najekonomiczniejsze. Urządzenie do spiekania /przedstawione na rys. 1 i 2/ wykonano w ramach własnych. Zapewnia ono naciski do 40 ton i temperaturę do  $1400^{\circ}C$ , co w zupełności wystarcza do osiągnięcia gęstości  $Al_2O_3$  bliskich teoretycznej.

Na podstawie prób z formami metalowymi, ceramicznymi i grafitowymi, za najkorzystniejsze uznano matryce grafitowe ze stemplami ceramicznymi. Dla uniknięcia

przyczepiania się spiekane go wyrobu do stempla, zastosowano wkładki grafitowe. Układ matrycy grafitowej ze stemplem ceramicznym i wkładką oddzielającą, stosowany przy wykonywaniu próbek, pokazano na rys. 3 i 4.



Rys. 2. Schemat blokowy urządzenia do spiekania pod ciśnieniem /własnej konstrukcji/



Rys. 4. Matryca, stempel i wkładka stosowane przy spiekaniu pod ciśnieniem

Dla dokonania wyboru najkorzystniejszego surowca  $Al_2O_3$  przeprowadzono próby z wieloma proszkami  $\alpha Al_2O_3$ . Przy wyborze kierowano się podatnością proszku na

spiekaniu, ale i możliwością zastosowania wytypowanego proszku w warunkach przemysłowych, uwzględniając krajową bazę materiałową. Do prób wytypowano  $Al_2O_3$  o następującej charakterystyce:

Ilość zanieczyszczeń:  $Na_2O \leq 0,08$      $SiO_2 \leq 0,05$   
 $MgO \leq 0,05$      $Fe_3O_3 \leq 0,01$   
 $CaO \leq 0,05$

Zawartość  $Al_2O_3 \leq 99,76\%$

Skład fazowy  $\leq 99\% Al_2O_3$

Średnie ziarno –  $0,3 \mu m$

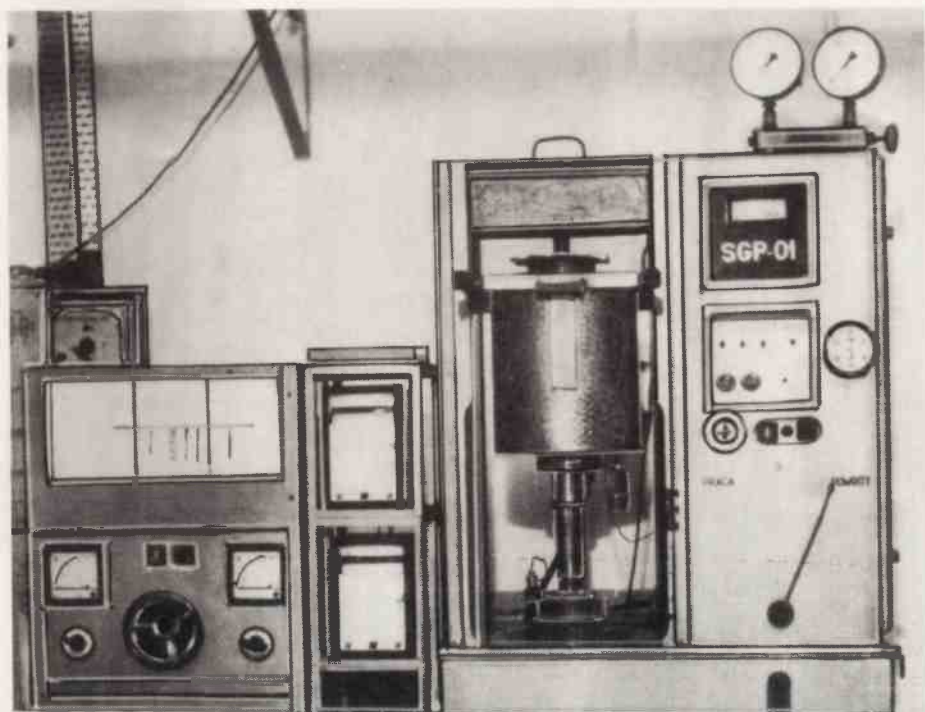
Dopuszczalna ilość zanieczyszczeń wynika z wymagań stawianych przez elektronikę. Dla obniżenia temperatury spiekania stosowano dwuprocentowy dodatek /wagowo/  $AlF_3$ . Składniki mieszano na mokro, mieszaninę suszono i przesiewano /mieszaninę  $Al_2O_3$  z dodatkiem  $AlF_3$  pokazano na rys. 5 - zdjęcie skanningowe/.

Mieszaninę proszku  $Al_2O_3$  z  $AlF_3$  zasypywano do formy grafitowej i wstępnie prasowano na zimno przy ciśnieniu  $150 \text{ kG/cm}^2$ . Tak napełnioną matrycę wkładano do urządzenia i przeprowadzano proces spiekania pod ciśnieniem. Próbkę wykonywano przy różnych relacjach temperatury, ciśnienia i czasu spiekania.

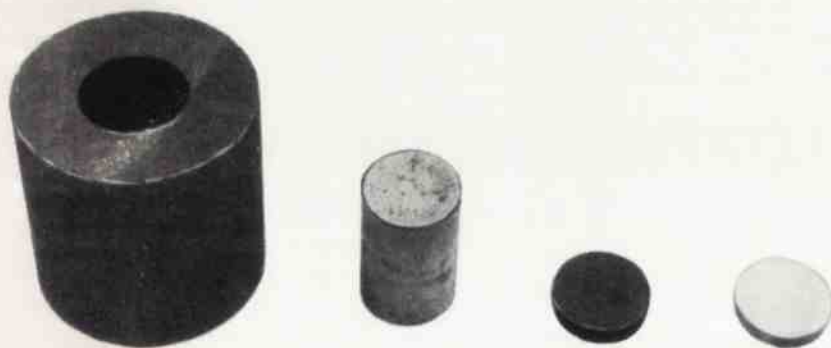
Tablica 2

Parametry technologiczne /temperatura, ciśnienie i czas spiekania/ stosowane przy wytwarzaniu poszczególnych próbek z  $Al_2O_3$  spiekanego pod ciśnieniem

Seria	Nr próbki	Temperatura T /°C/	Ciśnienie p /kG/cm <sup>2</sup> /	Czas spiekania t /min/
1	2	3	4	5
1	1	1100	160	30
	2			50
	3			70
	4			90
	5		180	30
	6			50
	7			70
	8			90
	9		200	30
	10			50
	11			70
	12			90
	13		220	30
	14			50
	15			70
	16			90



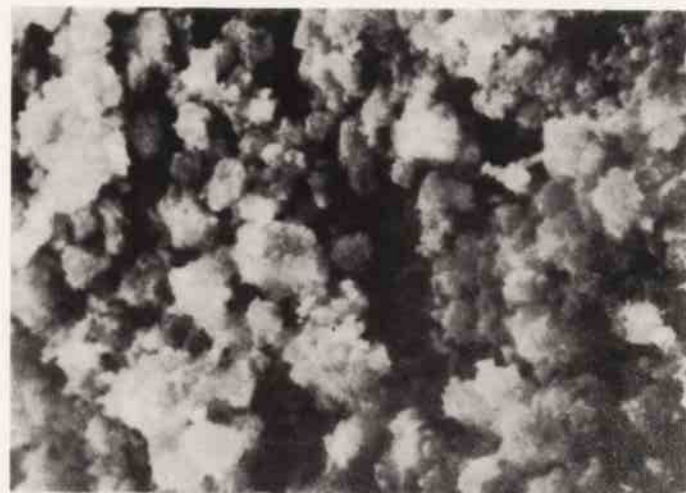
Rys. 1. Urządzenie do spiekania pod ciśnieniem



Rys. 3. Forma do spiekania /matryca grafitowa, stemoel ceramiczny, grafitowa wkładka oddzielająca, oraz spiekana próbka/



a)



b)

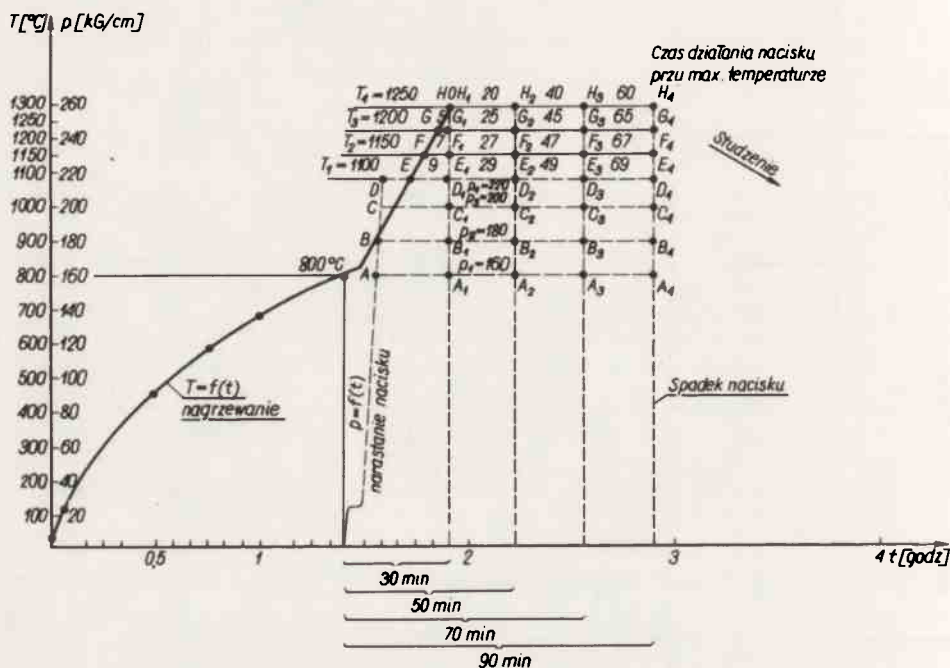
Rys. 5.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  z dodatkiem  $\text{AlF}_3$  /2%/ stosowany w badaniach  
a - pow. 1000x, b - pow. 3000x



1	2	3	4	5
II	17	1150	160	30
	18			50
	19			70
	20			90
	21		180	30
	22			50
	23			70
	24			90
	25		200	30
	26			50
	27			70
	28			90
29	220	30		
30		50		
31		70		
32		90		
III	33	1200	160	30
	34			50
	35			70
	36			90
	37		180	30
	38			50
	39			70
	40			90
	41		200	30
	42			50
	43			70
	44			90
45	220	30		
46		50		
47		70		
48		90		
IV	49	1250	160	30
	50			50
	51			70
	52			90
	53		180	30
	54			50
	55			70
	56			90
57	200	30		
58		50		
59		70		
60		90		

1	2	3	4	5
IV	61 62 63 64	1250	220	30 50 70 90

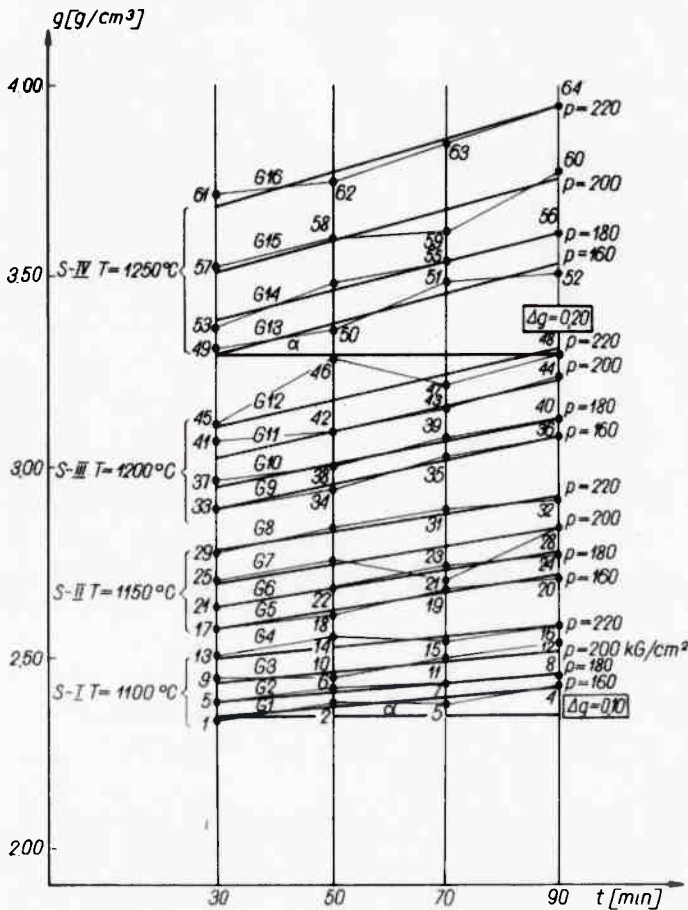
Parametry technologiczne stosowane przy wykonywaniu poszczególnych próbek zestawiono w tabl. 2. Próbkę wykonywano w 64 relacjach ciśnienia, temperatury i czasu spiekania, przy czym każdą próbkę wykonywano dwukrotnie. Reżim wykonania poszczególnych próbek przedstawiono na rys. 6. Spiekanie przeprowadzono w atmosferze otoczenia /utleniającej/.



Rys. 6. Program nagrzewania i działania ciśnienia w procesie spiekania pod ciśnieniem próbek  $Al_2O_3$

Przez pomiar objętości i ciężaru poszczególnych próbek ustalono gęstość pozorną. Relacje między stosowanymi parametrami technologicznymi /ciśnienia, temperatury i czasu spiekania/ a uzyskanymi gęstościami zobrazowano na rys. 7.

Po ustaleniu gęstości próbek, ustalono zależności między gęstością, a następującymi wybranymi właściwościami: twardością, przewodnością cieplną, opornością skrośną, wytrzymałością dielektryczną, wytrzymałością na zginanie.



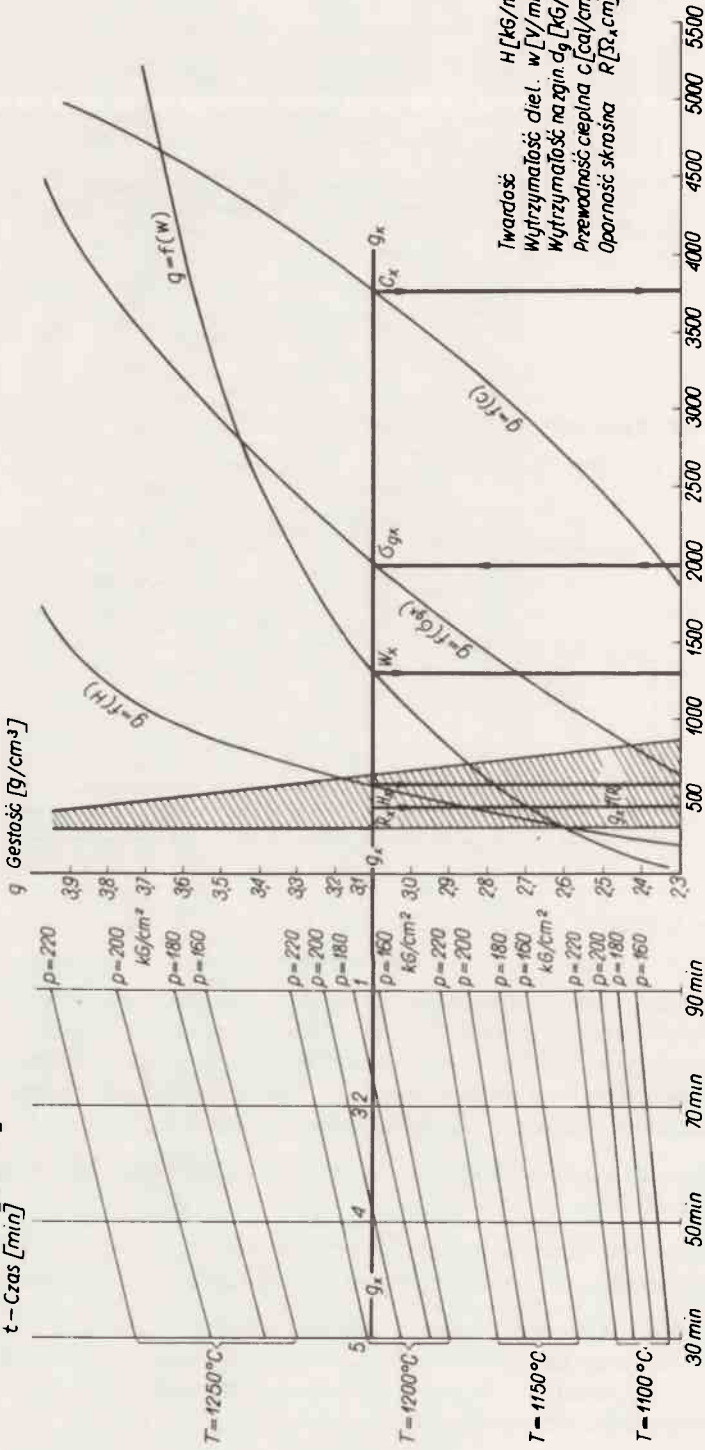
Rys. 7. Wykres funkcji  $n \quad g=f/t/$  dla różnych temperatur i ciśnień stosowanych przy spiekaniu

Przeprowadzono analizę matematyczną i ustalono związki matematyczne poszczególnych funkcji; wyniki analizy przedstawiono na rys. 8. Rysunek ten ujmuję w sposób syntetyczny najważniejsze wyniki badań i umożliwia dobór parametrów technologicznych /ciśnienia, temperatury i czasu spiekania/ dla uzyskania żądanej gęstości. Ponieważ od gęstości są zależne własności użytkowe spiekane pod ciśnieniem  $Al_2O_3$ , powstaje możliwość takiego zaprogramowania procesu technologicznego, aby uzyskać wyrób o żądanych własnościach.

Sposób postępowania ilustruje następujący przykład:

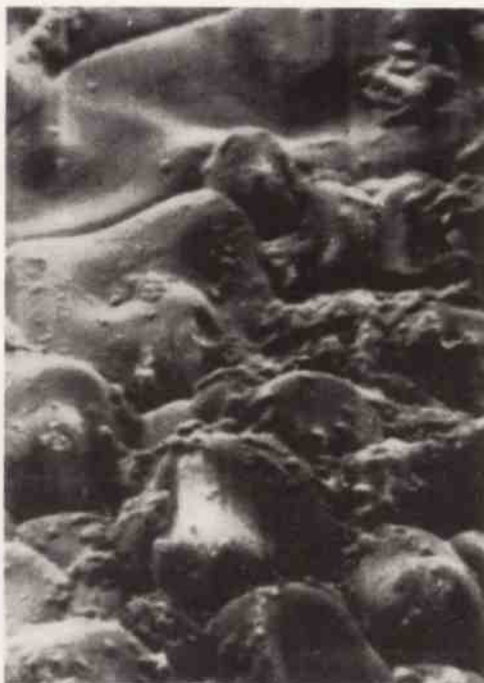
Żądamy spiekane  $Al_2O_3$  o wytrzymałości na zginanie /  $\sigma$  g/, większej niż 2000 kG/cm<sup>2</sup>. Jest niezbędne uzyskanie gęstości większej niż 3,1 g/cm<sup>3</sup>. Gęstość taką można uzyskać przy temperaturze  $T=1200^\circ C$ , ciśnieniu  $p=200$  kG/cm<sup>2</sup> i czasie spiekania  $t=30$  min /punkt 5/. Tę samą gęstość uzyskać można przy parametrach  $p, T$  i  $t/$  odpowiadających punktom 4, 3, 2 i 1.

T - Temperatura [°C]  
 p - Ciśnienie [kg/cm<sup>2</sup>]  
 t - Czas [min]

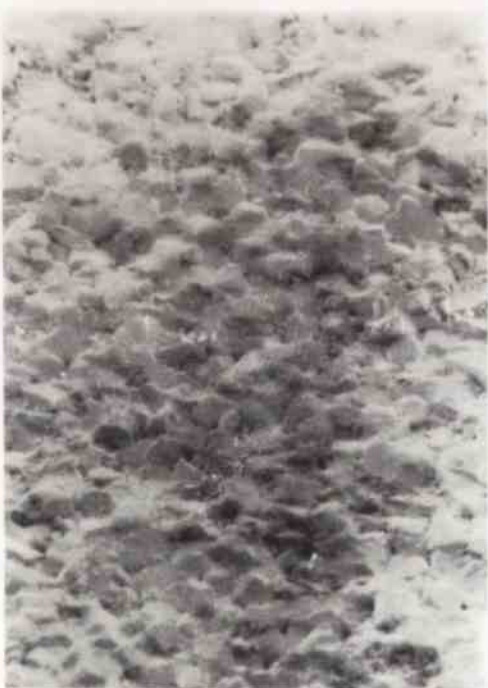




Rys. 13. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o uziarnieniu 3,5 μm przed spiekaniem /pow. 2000x/



Rys. 14. Powierzchnia Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o uziarnieniu 3,5 μm po spiekaniu bez ciśnienia w temperaturze 1750°C w ciągu 20 min /pow. 2000x/



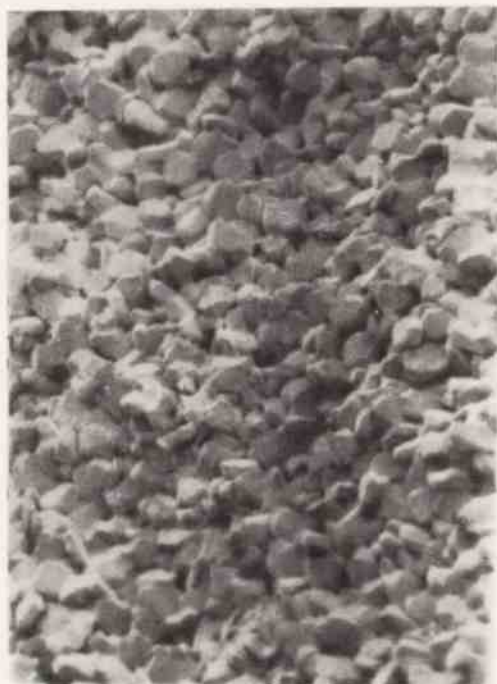
Rys. 15. Przetłom Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o uziarnieniu 0,3 μm spiekonego pod ciśnieniem 220 kG/cm<sup>2</sup> w temperaturze 1250°C i czasie 30 min /pow. 2000x/



Rys. 16. Przetłom Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o uziarnieniu 3,5 μm spiekanego bez ciśnienia w temperaturze 1750°C w ciągu 20 min /pow. 2000x/



Rys. 9. Przełom próbki spiekanej w temperaturze 1100°C pod ciśnieniem 220 kG/cm<sup>2</sup> w czasie 30 min /pow. 2000x/



Rys. 10. Przełom próbki spiekanej w temperaturze 1150°C pod ciśnieniem 220 kG/cm<sup>2</sup> w czasie 30 min /pow. 2000x/



Rys. 11. Powierzchnia próbki spiekanej w temperaturze 1200°C pod ciśnieniem 220 kG/cm<sup>2</sup> w czasie 30 min / pow. 2000x/



Rys. 12. Powierzchnia próbki spiekanej w temperaturze 1250°C pod ciśnieniem 220 kG/cm<sup>2</sup> w czasie 30 min /pow. 2000x/

Zapewniając wykonanie tworzywa o wytrzymałości na zginanie większej niż  $2000 \text{ kG/cm}^2$ , można mieć pewność, że przewodność cieplna  $/C_x/$  będzie większa niż  $3750 \text{ cal/cm} \cdot \text{sek}^\circ\text{C} \cdot 10^{-5}$ , wytrzymałość dielektryczna  $/W_x/$   $1300 \text{ V/mm}$ , twardość  $/H_x/$   $550 \text{ kG/mm}^2$  i odporność skrośna między  $3,0$  a  $6,5 \cdot \Omega \cdot \text{cm} \cdot 10^{13}$ .

Przeprowadzono ponadto badania dla stwierdzenia, czy w stosowanych procesach spiekania występuje zjawisko rekrytalizacji wtórnej połączonej z rozrostem ziaren. Analiza obrazów elektronicznych /skanningowych/ powierzchni i przełomów próbek wykazała, że zjawisko takie nie zachodzi /patrz rys. 9-12/. Dla kontrastu pokazano rozrost ziaren, występujący przy spiekaniu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bez ciśnienia, w temperaturze  $1750^\circ\text{C}$  /rys. 13 i 14/.

Rozkład porów resztkowych w drobnoziarnistym  $\text{Al}_2\text{O}_3$  spiekany pod ciśnieniem jest znacznie korzystniejszy niż w korundzie spiekany bez ciśnienia w wysokich temperaturach, co wykazano na rys. 15 i 16.

Przeprowadzone badania pozwalają na wyciągnięcie następujących ogólnych wniosków:

- Istnieje możliwość wykonania urządzeń do jednokierunkowego spiekania pod ciśnieniem, przez adaptację produkowanych seryjnie pras hydraulicznych. Zależnie od stopnia automatyzacji i rozwiązania komór roboczych, urządzenia mogą być dostosowane do prac laboratoryjnych lub do produkcji seryjnej.
- W procesie spiekania pod ciśnieniem, w temperaturach do  $1300^\circ\text{C}$ , mogą być stosowane bardzo łatwe w użyciu formy grafitowe. Przy zastosowaniu osłon ze stali żaroodpornej nie zachodzi potrzeba stosowania specjalnych atmosfer ochronnych lub próżni.
- Dla zapewnienia odpowiedniej reaktywności należy stosować  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o uziarnieniu około  $0,3 \mu\text{m}$ . Dla obniżenia temperatury spiekania, jest celowe stosowanie modyfikatorów, jak np.  $\text{AlF}_3$ .
- Przez odpowiedni dobór ciśnienia, temperatury i czasu spiekania można uzyskać żądaną gęstość, a osiągnięcie gęstości  $\text{Al}_2\text{O}_3$  zbliżonych do teoretycznej jest możliwe przy wartościach nie przekraczających następujących wielkości: ciśnienie  $p = 220 \text{ kG/cm}^2$ , temperatura  $T = 1250^\circ\text{C}$ , czas spiekania  $t = 90 \text{ min}$  /dla uziarnienia  $0,3 \mu\text{m}$ /.
- Dzięki niskiej temperaturze spiekania, po przejściu ziaren podstawowych  $/0,3 \mu\text{m}/$  w bryły wieloboczne o pokroju automorficznym  $/2,5 \mu\text{m}/$ , nie zachodzi ich dalszy rozrost.
- Dla badanych własności zależność między gęstością a daną własnością, jest funkcją rosnącą. W badanym obszarze nie stwierdzono punktów ekstremalnych, co wiąże się z brakiem rozrostu ziaren w procesie spiekania.
- Ustalone zależności nie są prostopadłymi. Mają one charakter trójmianów kwadratowych o postaci ogólnej:

$$ax^2 + bx + c = g$$

Nie stwierdzono związku między gęstością a opornością skrośną. Ze względu na zanieczyszczenie próbek grafitem wartość oporności skrośnej wahała się między  $10^{13}$  a  $10^{14}$   $\Omega \cdot \text{cm}$  i było niezależna od gęstości.

- Stwierdzono, że w czasie napełniania matrycy, wstępnego prasowania na zimno i spiekania pod ciśnieniem, okruchy grafitu ze ścianek matrycy są przenoszone w głąb próbki i wpływają na własność spiekane  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
- Przyjęte warunki i parametry technologiczne dla spiekania pod ciśnieniem /przy temperaturze do  $1250^\circ\text{C}$ / umożliwiają osiągnięcie wyższej gęstości i lepszych własności  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , niż przy spiekaniu bez oddziaływania ciśnienia w temperaturze  $1800^\circ\text{C}$  /por. tabl. 1 z rys. 8/.
- Przez odpowiedni dobór ciśnienia temperatury i czasu spiekania można uzyskać żądaną gęstość i wynikające z tej gęstości własności użytkowe /rys. 8/.

W trakcie badań ustalono i zinterpretowano związki między gęstością a wybranymi własnościami spiekane pod ciśnieniem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  /dla opracowanej technologii/. Opracowano system doboru ciśnienia, temperatury i czasu spiekania dla uzyskania żądanej gęstości / od gęstości wstępnego sprasowania aż do gęstości bliskich teoretycznej/. Opracowano tym samym system uzyskiwania ceramiki korundowej o żądanych własnościach, co ma istotne znaczenie praktyczne.

Ze względu na obszerną problematykę praca niniejsza wymagała dużego nakładu pracy. Choć osiągnięto założony cel, wiele ciekawych problemów nie zostało do końca wyjaśnionych i wymaga dalszych badań.

Autorzy mają nadzieję, że nawet w skrótowym ujęciu praca niniejsza stanie się urzeczywistnieniem do rozwoju techniki spiekania pod ciśnieniem w Polsce.