

Przemysław Ranachowski\*

## **CERAMIKA FUNKCYJNALNA I KONSTRUKCYJNA W ELEKTROTECHNICE**

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono podział ceramiki technicznej na funkcjonalną i konstrukcyjną z uwzględnieniem tworzyw stosowanych w elektrotechnice. Podano zasadnicze procesy technologiczne produkcji tych tworzyw, przybliżone składy surowcowe, składy fazowe czerepów i budowę strukturalną. Zebrano również podstawowe własności funkcjonalne.

**Słowa kluczowe:** ceramika elektrotechniczna, porcelana, steatyt, kordieryt, korund, procesy technologiczne wytwarzania

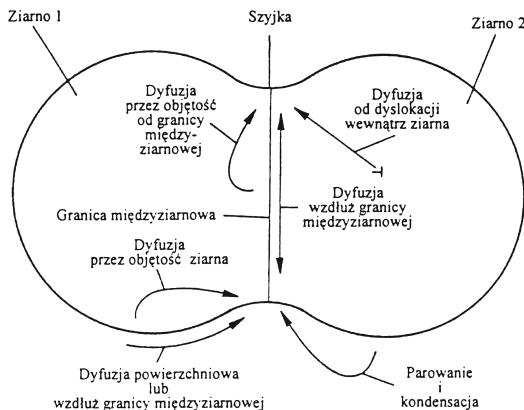
### **1. Wstęp**

Tworzywa ceramiczne o znanej od tysięcy technologii doczekały się dopiero w latach pięćdziesiątych naszego stulecia teoretycznego opisu zjawisk zachodzących w procesie ich powstawania. Proces ten ogólnie można podzielić na etapy dotyczące przygotowania mas, wstępne zagęszczanie, wypalanie i rekrytalizację oraz obróbkę końcową wyrobu. W miarę wzrastających wymagań eksploatacyjnych zachodziła konieczność stosowania różnych materiałów ceramicznych o coraz bardziej wyrafinowanych technologiach. Podstawowym warunkiem uzyskania tworzywa o wysokich parametrach użytkowych, zwłaszcza dla potrzeb elektrotechniki było odchodzenie od nieprzetworzonych surowców naturalnych w kierunku surowców wysoko przetworzonych, a również całkowicie syntetycznych. Źródłem tej ewolucji był rozwój nowej interdyscyplinarnej dziedziny wiedzy — nauki o materiałach, której aspektem aplikacyjnym stała się inżynieria materiałowa. Autor w prezentowanej pracy pragnie przedstawić

---

\* Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, ul. Świętokrzyska 21, 00-049 Warszawa

problematykę wytwarzania technicznych materiałów ceramicznych dla potrzeb elektrotechniki, ze szczególnym uwzględnieniem związku mikrostruktury z własnościami elektrycznymi, mechanicznymi i termomechanicznymi. Za najważniejsze parametry użytkowe dla tworzyw rozpatrywanych pod kątem izolacji wysokonapięciowej uznano wytrzymałość dielektryczną, doraźną wytrzymałość mechaniczną oraz odporność na procesy starzeniowe i naprężenia termomechaniczne. Jednym z głównych czynników wiążących wszystkie powyższe własności jest zagadnienie występowania w materiałach ceramicznych fazy gazowej — porów. Obecność tej fazy wynika z istoty procesu powstawania tworzywa ceramicznego.



**Rys. 1.** Model transportu masy podczas spiekania układu dwóch stykających się ziarn [1]

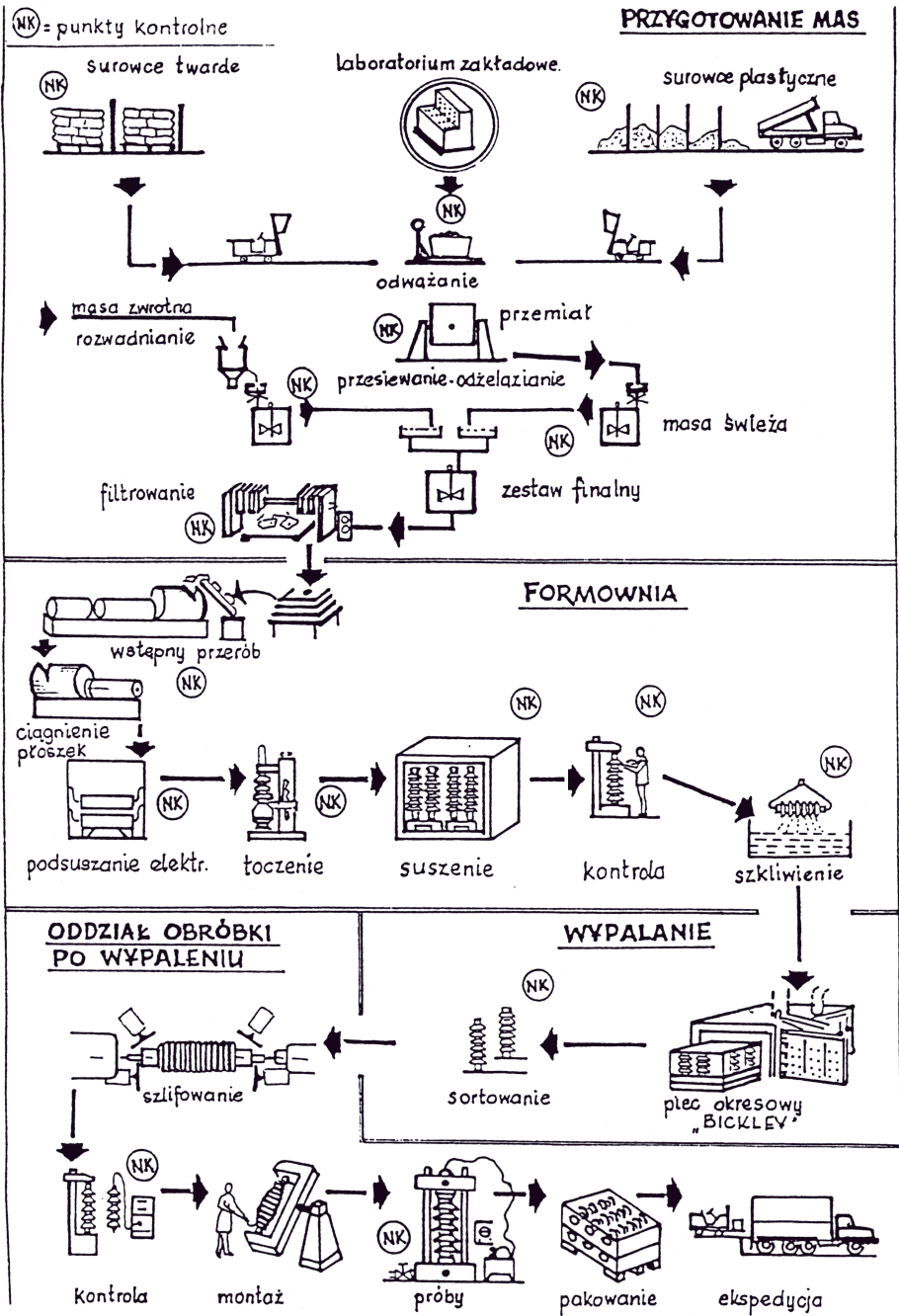
Czynnikiem napędowym procesu zagęszczania masy jest obniżanie energii swobodnej drobno zmielonych ziarn surowców. Zaznaczyć jednak należy, iż najnowsze kierunki technologii pozwalają na wykorzystanie reakcji chemicznych wytrącania cząstek surowca z roztworu koloidalnego i w dalszym etapie krystalizacji mikroziarn. Umożliwia to ogromne rozwinięcie powierzchni swobodnej układu bez konieczności zastosowania energochłonnego procesu mielenia i poważnie obniża temperaturę wypalania masy o bardzo wysokim stopniu zdyspersgowania. Niezależnie jednak od sposobu przygotowania surowców, tworzenie się jednorodnego ośrodka z aglomeratu ziarn następuje w procesie właściwego spiekania. Proces ten przebiega na drodze dwóch różnych mechanizmów — lepkiego płynięcia lub zagęszczania dyfuzyjnego. Pierwszy z nich występuje w przypadku spiekania materiałów amorficznych lub cząstek submikroskopowych. Drugi w przypadku ziarn o budowie krystalicznej. Tworzywa dla elektrotechniki, takie jak porcelana lub kordieryt, zawierające 40÷65% osnowy szklistej spiekają się według obu mechanizmów. Natomiast tworzywa steatytowe, korundowe, cyrkonowe oraz azotki i węgliki spiekają się przeważnie zgodnie z mechanizmem dyfuzyjnym. Jeden i drugi mechanizm cechuje pozostawienie pustych przestrzeni międzyziarnowych — porów. Obecność fazy gazowej w strukturze jest decydująca zarówno dla wytrzymałości dielektrycznej, jak i mechanicznej tworzywa. Stąd zawartość porów jest miarą zagęszczenia układu i świadczy o prawidłowości przeprowadzonego procesu spiekania.

## 2. Ceramika w elektrotechnice

Rozpatrywane w pracy tworzywa należą do grupy ceramiki technicznej. Są to materiały używane w technice i medycynie. Ceramikę techniczną dzieli się na funkcjonalną i konstrukcyjną. Przez pojęcie tworzyw funkcjonalnych rozumie się materiały, z których wykonane elementy spełniają określone funkcje, na przykład elektroizacyjną, magnetyczną, ferroelektryczną, łukoodporną, nadprzewodzącą i inną specjalną. Przez pojęcie ceramiki konstrukcyjnej rozumie się materiały, które przenoszą obciążenia mechaniczne rozciągające, ściskające, zginające i skręcające. Steatyt i kordieryt zwyczajowo zaliczane są do ceramiki funkcjonalnej [2]. Porcelana elektrotechniczna, jakkolwiek spełnia funkcje dielektryczne, przenosi również obciążenia mechaniczne, łącząc elementy układu będące względem siebie pod napięciem. W nowoczesnej technice wysokich napięć, przy zastosowaniu izolatorów pełnopniowych, gdzie naprężenia dielektryczne są stosunkowo niewielkie, najważniejszym zadaniem jest przejmowanie wysokich naprężeń mechanicznych. Stąd porcelana elektrotechniczna zaliczana jest do ceramiki konstrukcyjnej. Podobnie rzecz się ma w przypadku tworzyw korundowych wykorzystywanych do produkcji elementów konstrukcyjno-izolacyjnych, najczęściej do pracy w wysokich temperaturach. Na ogół jednoznaczne zakwalifikowanie rodzaju ceramiki technicznej do jednej grupy jest trudne, co ma miejsce na przykład dla steatytu lub chemoceramik.

Dla wszystkich rodzajów ceramiki technicznej powtarzają się te same procesy technologiczne produkcji. Etapy te, jakkolwiek zbliżone z uwagi na specyfikę surowców, charakter produkcji i wymagane własności gotowego wyrobu, mogą przebiegać zgodnie z różnymi reakcjami chemicznymi, w różnych temperaturach i wymagać odmiennych urządzeń. Na rysunku 2 przedstawiono proces produkcji izolatorów pełnopniowych, stosowany w Zakładach Porcelany Elektrotechnicznej ZAPEL w Boguchwale.

Porcelana, której technologia opracowana została w Chinach około dwa tysiące lat temu należy do najdoskonalszych tworzyw ceramicznych. Jej technologia jest na tyle skomplikowana, że dopiero w 1709 r. udało się ją odtworzyć w Europie, przy czym szereg zjawisk zachodzących w poszczególnych etapach wytwarzania nie jest do dzisiaj wyjaśnionych [3]. Fakt poświęcenia największej uwagi tworzywom porcelanowym wynika z tego, iż był to pierwszy i jest nadal jednym z najważniejszych materiałów izolacyjnych, używanym przede wszystkim do produkcji różnego typu izolatorów i osłon. Zgodnie z normą PN-86/E-06301 [4] izolatory i osłony elektrotechniczne wykonywane są z tworzyw grupy 100 trzech rodzajów 110, 120 i 130. Tworzywo rodzaju 110, najbardziej zbliżone do tradycyjnego składu surowcowego porcelany (ok. 50% minerałów ilastych, po około 25% skaleni i kwarcu), służy głównie do produkcji izolatorów teletechnicznych oraz liniowych niskich i średnich napięć, a także przepustów aparaturowych i stacyjnych. Tworzywo wysokoglinowe rodzaju 120 posiada w składzie surowcowym kwarc całkowicie zastąpiony przez ceramiczny tlenek glinu. W jego strukturze obserwuje się znacznie mniejszą ilość reliktyw kwarcowych przy wysokiej, przekraczającej 30% zawartości łuskowego mulitu pierwotnego, jak i rekrytalizowanego igłowego mulitu wtórnego ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ). Porowatość czerepów porcelanowych jest silnie uzależniona od składu masy i technologii procesów zagęszczania, a przede



Rys. 2. Schemat produkcji ceramicznych izolatorów pełnopornych w ZPE ZAPEL w Boguchwale

wszystkim wypalania. Za najwyższą dopuszczalną wartość przyjmuje się 8%, przy czym często obserwuje się znaczące różnice porowatości na długości pnia izolatora. Masa wysokoglinowa służy głównie do produkcji izolatorów liniowych i stacyjnych średnich i wysokich napięć, przepustów stacyjnych oraz osłon izolacyjnych. Wysokoglinowe tworzywo o dużej wytrzymałości rodzaju 130 zawiera w składzie surowcowym ponad 40% minerałów ilastych, około 20% skaleń oraz do 40% ceramicznego tlenku glinu. W obrazie strukturalnym masy stwierdzić można dużą ilość (około 20% powierzchni zglądu) drobnych, włóknistych ziarn korundu ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) przy dosyć wysokiej zawartości mulitu oraz niewielkiej ilości drobniejszych reliktyw kwarcowych. Tworzywo służy głównie do produkcji izolatorów stacyjnych i liniowych wysokich i najwyższych napięć oraz wielkogabarytowych osłon izolacyjnych. Masa rodzaju 130 wypiera obecnie inne rodzaje tworzyw porcelanowych i jest coraz szerzej stosowana w technice wysokich napięć, zarówno w kraju, jak i zagranicą [5]. Tworzywa steatytowe i kordierytowe zawierają się w potrójnym układzie równowagi fazowej  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ . Między sobą jednak różnią się budową strukturalną i własnościami. Analogicznie jak w przypadku porcelany elektrotechnicznej, steatyt wytwarzany jest w kilku rodzajach. Steatyt prasowany 210 stosowany jest do produkcji elementów niskonapięciowych, steatyt elektrotechniczny 220 wykorzystywany jest w izolatorach i elementach izolacyjnych wysokonapięciowych i niskonapięciowych o dużej wytrzymałości mechanicznej i podwyższonych temperaturach eksploatacji. Steatyt specjalny rodzaju 221 produkowany również dla potrzeb elektrotechniki odznacza się niskim współczynnikiem stratności dielektrycznej  $\text{tg } \delta$  (poniżej 1,5). W składzie surowcowym typowego steatytu dominuje talk, stanowiący ok. 80%, pozostała część przypada po połowie na minerały ilaste oraz topniki ułatwiające proces spiekania masy. Rodzaj zastosowanego topnika determinuje własności elektryczne steatytu. W przypadku tworzyw rodzaju 210 i 220 stosuje się skaleń, a na masę rodzaju 221 węgiel baru. Niezależnie od własności elektrycznych steatyt wyróżnia duża wytrzymałość mechaniczna — niemal dwukrotnie wyższa od zwykłej porcelany elektrotechnicznej. Wynika to z wysokiej, sięgającej 75% zawartości fazy krystalicznej, którą tworzą drobne ziarna metakrzemianu magnezu ( $\text{MgSiO}_3$ ) powstającego podczas wypalania talku w temperaturach przekraczających  $1000^\circ\text{C}$  oraz minimalnej porowatości. Jednorodną, drobnoziarnistą strukturę steatytu, zawierającą około 25% osnowy szklistej można porównać do porcelany rodzaju 130.

Tworzywa kordierytowe rodzaju 410 stosowane są do produkcji elementów lu-koodpornych i żaroodpornych przeznaczonych do pracy w wysokich temperaturach (do  $1200^\circ\text{C}$ ) i odpornych na gwałtowne zmiany temperatury. Czysty kordieryt ( $2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$ ) jest minerałem o najniższej rozszerzalności termicznej. Uzyskanie jednak tworzywa o bardzo wysokiej zawartości tego składnika jest trudne z uwagi na wąski interwał temperatur spiekania i wymagania odnośnie reżimu technologicznego. Zaradza się temu przez wprowadzenie faz „rozcieńczających” zawartość właściwego kordierytu jak mulit, szkło o niskiej rozszerzalności termicznej lub krzemian cyrkonu ( $\text{ZrSiO}_4$ ). Dodatki te jednak obniżają właściwości cieplne kordierytu i zawężają zakres zastosowań wytwarzanych materiałów. Typowa struktura kordierytu zawiera ok. 70% matrycy kordierytowo-szklistej, do 20% mulitu i reliktyw kwarcowych oraz kilkanaście procent porów. Surowce stanowią obok talku lub magnezytu minerały ila-

**Tabela 1.** Wybrane własności fizyczne opisanych tworzyw ceramicznych użyteczne w opracowaniu badań nieniszczących

Właściwość	Symbol i jednostka	Tworzywo					
		Porcelana C 110	Porcelana C 120	Porcelana C 130	Steatyt C 220-221	Kordieryt C 410	Korund C 799
Gęstość	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,2÷2,3	2,3÷2,6	2,5÷2,8	2,7÷3,2	1,9÷2,6	3,7÷3,95
Porowatość	$p$ [%]	4÷8	3÷8	2÷7	0,0÷1,5	0,5÷16	0,0
Wytrzymałość na zginanie	$R_g$ [MPa] (N/mm <sup>2</sup> )	40÷60	70÷100	130÷160	100÷140	60÷130	300÷450
Moduł Younga	$E$ [GPa]	60÷70	70÷90	90÷110	70÷130	45÷110	300÷405
Prędkość fal podłużnych	$c_L$ [m/s]	5000÷6000	5400÷6200	6000÷7100	6500÷7200	6000÷7300	9400÷10600
Prędkość fal poprzecznych	$c_T$ [m/s]	2900÷3600	3200÷3700	3600÷4200	3800÷4300	3500÷4300	5600÷6300
Wytrzymałość dielektryczna	$E_d$ [kV/mm]	15÷25	15÷30	25÷50	15÷25	10÷20	17÷30
Współczynnik rozszerzalności liniowej	$\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] $\cdot 10^{-6}$ 20÷600°C	4÷7	4÷7,5	5÷8	7÷9	2÷4,5	6,5÷9

ste, skalenie oraz ewentualnie tlenek glinu lub krzemian cyrkonu, stosowane w różnych proporcjach.

Materiały korundowe grupy 700 stosowane są do produkcji elementów konstrukcyjno-izolacyjnych do pracy w wysokich temperaturach na przykład w izolatorach oraz w elektronice, urządzeniach półprzewodnikowych i układach scalonych. Podstawowymi parametrami tych tworzyw są wysoka wytrzymałość mechaniczna, bardzo wysokie przewodnictwo cieplne, wysoka rezystywność oraz niski współczynnik stratności dielektrycznej  $\tan \delta$ . Własności te osiąga się dzięki jednorodnej drobnokrystalicznej strukturze o bardzo małej zawartości fazy międzyziarnowej i minimalnej porowatości. Przybliżony skład tworzywa korundowego to ponad 80% ceramicznego tlenku glinu odmiany  $\alpha$ , resztę stanowi  $\text{SiO}_2$  oraz nieco  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  oraz tlenków metali 1 i 2 grupy. W obrazie strukturalnym tworzywa widoczne są drobne wieloboczne ziarna korundu z minimalną zawartością osnowy szklistej oraz porów na granicach i wewnątrz ziarn. Podstawowe własności fizyczne ww. tworzyw zestawiono w tabeli 1.

Przedstawiona praca stanowi wstęp zapoznający czytelnika z podstawami technologii, składu surowcowego, budowy strukturalnej oraz własności tworzyw stosowanych w elektrotechnice. Dane te konieczne były do opracowania nieniszczących ultradźwiękowych metod oceny jakości i własności wyrobów ceramicznych dla elektrotechniki. Problematyka ta stanowi przedmiot pracy pt. „Metody akustyczne w badaniach ceramicznych izolatorów energetycznych”.

## Literatura

- [1] **Oczoł K. E.:** *Kształtowanie ceramicznych materiałów technicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1996, 156
- [2] **Raabe J., Bobryk E.:** *Ceramika funkcjonalna — metody otrzymywania i własności*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997, 8–9
- [3] **Carty W. M., Senapati U.:** *Porcelain — Raw Materials, Processing, Phase Evolution and Mechanical Behavior*. J. Am. Ceram. Soc. 81 [1], 1998, 3–20
- [4] PN-86/E-06301 — *Elektroizolacyjne materiały ceramiczne. Klasyfikacja i wymagania*
- [5] **Nowożeniuk A., Migas P.:** *Tworzywa ceramiczne — ich dobór do produkcji izolatorów w świetle aktualnych badań i wymagań energetyki*. Mat. VI Symp. Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia EUI'97, Wyd. Zakładu Elektroenergetyki AGH, Zakopane – Kraków 1997, 247–252

### FUNCTIONAL AND STRUCTURAL CERAMICS IN ELECTROTECHNOLOGY

The paper presents a division of electrical porcelain to two domains: functional and structural ones, taking into account the materials applied in electrotechnology. The basic technological processes during manufacturing of the materials have been specified, also approximate raw materials compositions, phase compositions of pots and structural constitutions were listed. The basic functional properties of the analysed materials have been also collected.