



ceramika inżynierska – w tej grupie znajduje się diament, czyli najtwardszy znany człowiekowi materiał, ale również materiały takie jak korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) czy azotek krzemu ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), których wytrzymałość znacznie przewyższa znane nam inżynierskie stopy metali. Zrozumiałym stało się więc, że materiały te zyskują coraz to większą popularność i coraz częściej znajdują zastosowanie w konstrukcjach wysokociśnieniowych pomp paliwowych. Ma to miejsce przede wszystkim dzięki zwiększonej odporności na ścieranie oraz twardości, dzięki czemu podczas pracy pompy minimalizowane jest powiększanie się luzu promieniowego w parze precyzyjnej – w konsekwencji w szczelinę nie dostają się większe ziarna ok  $10\ \mu\text{m}$ , a te które się dostają nie powodują bruzdowania, gdyż ze względu na większą wytrzymałość materiały konstrukcyjnego, są rozkruszane.

## 1. CHARAKTERYSTYKA CERAMIKI INŻYNIERSKIEJ

Ceramikę spotykamy codziennie w postaci porcelany stołowej, armatury łazienkowej, czy materiałów budowlanych takich jak cegły i beton. Jednak taka ceramika składa się z reguły z tlenków metali. Często nieustalony i niepowtarzalny skład surowców z których produkuje się wyroby z tego typu ceramiki sprawia, że posiadają one nieco przeciętne właściwości eksploatacyjne – charakteryzuje je zwłaszcza duża kruchość. Za jakość ceramiki, a zatem za jej właściwości eksploatacyjne odpowiada przede wszystkim wielkość ziaren. Ceramika gospodarcza (tak nazywana jest ceramika wykorzystywana do wcześniej wymienionych wyrobów) charakteryzuje się dużą nierównomiernością rozmiarów ziaren o średnicy od  $15\ \mu\text{m}$  do  $150\ \mu\text{m}$ , natomiast ceramika techniczna (zwana również ceramiką inżynierską) posiada ziarna o średnicy od  $1\ \mu\text{m}$  do  $2\ \mu\text{m}$ . Większy rozmiar ziarna wpływa na zwiększenie porowatości i zmniejszenie właściwości mechanicznych ceramiki, czego konsekwencją jest odporność na zginanie na poziomie  $100\ \text{MPa}$  – w dla ceramiki gospodarczej. W przypadku ceramiki inżynierskiej, gdzie wielkość ziaren jest znacznie mniejsza, a co za tym idzie również porowatość, odporność na zginanie osiąga wartości z zakresu od  $900\ \text{MPa}$  do nawet  $1100\ \text{MPa}$  [4].

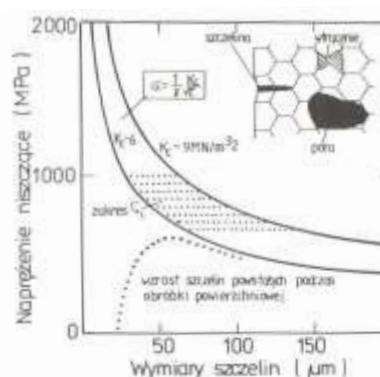
### 1.1. Tlenek glinu - $\text{Al}_2\text{O}_3$

Jednym z najbardziej popularnych materiałów należących do grupy ceramiki inżynierskiej jest  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o czystości  $99,7\%$ . Ta ceramika tlenkowa została wprowadzona do produkcji narzędzi już w 1957 roku. Jest ona bardzo popularna głównie ze względu na niski koszt wytworzenia oraz wystarczające właściwości mechaniczne, które względem wszystkich produktów należących do tej grupy są przeciętne. W zależności od procesu technologicznego w którym zostaje wytworzona, a dokładniej wielkości ziaren jaką dany proces technologiczny pozwolił uzyskać, jej wytrzymałość na zginanie mieści się w zakresie od  $70\ \text{MPa}$  (dla ziaren o rozmiarach od  $50\ \mu\text{m}$  do  $150\ \mu\text{m}$ ) do  $450\ \text{MPa}$  (dla ziaren o rozmiarze około  $2\ \mu\text{m}$ ). Obecnie coraz częściej w miejsce czystego  $\text{Al}_2\text{O}_3$  stosuje się tzw. ceramikę czarną, która oprócz  $\text{Al}_2\text{O}_3$  zawiera również dodatek TiC co podwyższa jej odporność na zginanie do wartości rzędu  $650\ \text{MPa}$ . Innym sposobem zwiększania właściwości mechanicznych ceramiki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  jest dodawanie około  $5\%$  molibdenu, który w czasie spiekania ogranicza rozrost ziaren, dzięki czemu ich wymiary utrzymują się na poziomie do  $1\ \mu\text{m}$  do  $2\ \mu\text{m}$ . Zastosowanie dodatku molibdenu sprawia, że przeciętna wartość wytrzymałości na zginanie plasuje się na poziomie  $700\ \text{MPa}$ , a co doskonalsze próbki osiągają nawet  $900\ \text{MPa}$ . Ceramika  $\text{Al}_2\text{O}_3$  z dodatkiem  $5\%$  molibdenu nosi nazwę FORD DSA.

### 1.2. Azotek krzemu - $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$

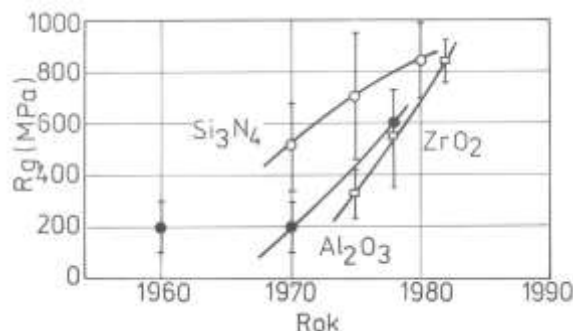
Innym typem ceramiki inżynierskiej cieszącym się rosnącym zainteresowaniem jest ceramika typu  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , którą zaczęto stosować

w latach siedemdziesiątych. Ceramika ta charakteryzuje się nieco trudniejszym procesem produkcyjnym niż wcześniej omawiana  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , gdyż najpierw należy wyprodukować ceramikę  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ , którą następnie przerabia się celem otrzymania ceramiki  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  posiadającej o wiele lepsze właściwości. Najlepszym sposobem jej wytwarzania jest wysokotemperaturowe izostatyczne prasowanie ceramiki  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ , pozwalające na uzyskanie ceramiki  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  całkowicie pozbawionej faz szklistych, bądź z ich minimalną ilością. Azotki krzemu mogą również powstawać wskutek azotowania spiekane go wyrobu z krzemu. Ceramikę  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  charakteryzuje bardzo wysoka odporność termiczna, co pozwala eksploatować wyroby z niej wykonane w bardzo niekorzystnych termicznie warunkach. Wytrzymałość mechaniczna na poziomie  $1000\ \text{MPa}$  osiągnięta jest w przypadku wyprodukowania ceramiki posiadającej defekty o wymiarach mniejszych niż  $30\ \mu\text{m}$ . Doświadczenie praktyczne pokazało jednak, że ogromny wpływ na wytrzymałość na zginanie mają defekty powstałe podczas obróbki wykończeniowej gotowych już wyrobów, co przedstawiono linią kropkowaną na rysunku 2.



Rys. 2. Zależność wytrzymałości na zginanie ceramiki krzemowo-azotkowej od wymiarów defektów [5]

W przypadku ceramiki  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  problemem jest również spory rozrzut wyników przy pomiarach wytrzymałości większej liczby próbek. Bardzo dobrze zobrazowane jest to na rysunku 3, gdzie przedstawiono zmianę wytrzymałości trzech najpopularniejszych typów ceramiki na przestrzeni lat.

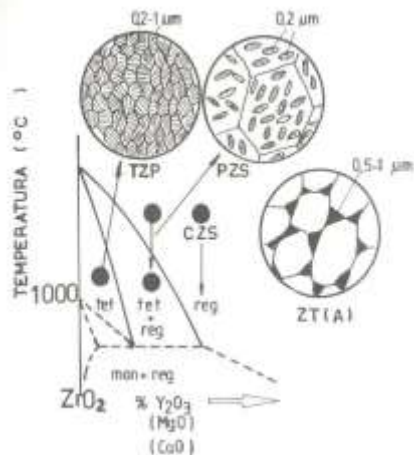


Rys. 3. Zmiana wytrzymałości na zginanie ceramiki  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oraz  $\text{ZrO}_2$  wytwarzanej w różnych latach [4]

Ze względu na swoje właściwości wysokotemperaturowe, ceramika krzemowo-azotkowa wykorzystywana jest głównie do produkcji wyrobów, narażonych na działanie wysokich temperatur, takich jak np. wirniki turbin gazowych. Wysoka odporność mechaniczna spowodowała również podjęcie prób zastosowań  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  do produkcji elementów łożysk takich jak kulki i wałki toczne. Jednak ze względu na wyższą (około 10 razy) niż w przypadku łożysk stalowych cenę nie są powszechnie wykorzystywane.

### 1.3. Tlenek cyrkonu – ZrO<sub>2</sub>

Kolejny typ ceramiki inżynierskiej w swoim składzie posiada głównie tlenek cyrkonu. Ceramika cyrkonowa ZrO<sub>2</sub>, zaliczana jest do jednych z najlepszych materiałów konstrukcyjnych pod względem wytrzymałości na zginanie i pękanie w temperaturze otoczenia. Ten typ ceramiki można podzielić na 3 grupy, dokonując podziału ze względu na udział tlenków towarzyszących, co przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Gatunki ceramiki cyrkonowej [6]

Ceramika cyrkonowa posiadająca w swoim składzie 2-4% mol Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> posiada strukturę tetragonalną i oznaczana jest skrótowo jako TZP.

Podczas spiekania tlenku cyrkonu w względnie niskich temperaturach (około 1400 °C) otrzymuje się produkt o bardzo małych ziarnach, których rozmiary rzadko przekraczają 0,2 μm. Ze względu na niską temperaturę spiekania, do wytworzenia tego rodzaju ceramiki konieczna jest faza ciekła rozłożona na granicach ziaren. Ten gatunek ceramiki cyrkonowej oznaczany jest skrótowo jako ZTA.

Trzeci gatunek ceramiki cyrkonowej powstaje przy dodatku od 8% do 10 % mol MgO, CaO lub Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i spiekaniu w temperaturze sięgającej około 1800 °C. W celu osiągnięcia odpowiednich właściwości gotowe wyroby następnie poddaje się wyżarzaniu w temperaturze od 1100 °C do 1450 °C podczas którego z jednorodnego roztworu wydzielają się dyspersyjne cząstki tlenku cyrkonu o tetragonalnej strukturze. Dzięki tej przemianie ceramika cyrkonowa, która oznaczana jest skrótowo jako PSZ, zyskuje bardzo wysoką odporność na pękanie K<sub>1c</sub> na poziomie 10 MN/M<sup>3/2</sup>. Własności różnych rodzajów ceramiki cyrkonowej przedstawione zostały w tabeli 1.

Ceramika drobnoziarnista o mikrostrukturze tetragonalnej charakteryzuje się znakomitą wytrzymałością na zginanie sięgającą aż 2500 MPa, co pozwala na zastosowanie jej do produkcji elementów łożyskujących narażonych na działanie podwyższonych temperatur i pracujących bez dodatkowego smarowania.

## 2. ZASTOSOWANIE CERAMIKI INŻYNIERSKIEJ W UKŁADACH PALIOWYCH

Ceramika inżynierska dzięki swoim właściwościom coraz częściej znajduje zastosowanie w konstrukcjach układów paliwowych.

Tab. 1. Struktura i własności różnych gatunków ceramiki cyrkonowej [7]

Typ	Skład i producenci	Mikrostruktura	Własności	
			MOR [MPa]	K <sub>1c</sub> [MN/m <sup>3/2</sup> ]
TZP	2-4% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ZrO <sub>2</sub> spiekana w 1400 °C NGK Z 191	drobnoziarnista całkowicie tetragonalna	1000-2500	7-12
PSZ	8-10% MgO/ZrO <sub>2</sub> spiekana w 1800 °C obrabiata cieplnie w 1100-1450 °C Feldmuhle ZN40 Coors	tetragonalny ZrO <sub>2</sub> wydzielony w regularnej osnowie	600-800	6-8
ZTA			500-1300	5-8

Dzięki wysokiej odporności na zginanie zastosowanie ceramiki w układach paliwowych zasilających silniki o zapłonie samoczynnym, możliwe jest zwiększenie ciśnienia wtrysku bez negatywnego spadku niezawodności. Dodatkowo wysoka twardość sprawia, że wyroby z ceramiki są bardziej odporne na działanie zanieczyszczeń zawartych w paliwie oraz niską smarność współczesnych paliw. Ma to istotny wpływ w przypadku systemów paliwowych do silników o zapłonie iskrowym, gdzie zastosowanie benzyn bezołowiowych o minimalizowanej zawartości związków siarki idące w parze z rosnącymi ciśnieniami wtrysku paliwa często prowadzi do przedwczesnego zużycia się elementów i unieruchomienia silnika.

### 2.1. Wtryskiwacz

Jednym z pierwszych znanych przypadków zastosowania ceramiki w układzie paliwowym zasilającym silnik o zapłonie samoczynnym pojazdu HDV był element wtryskiwacza UIS stosowanego w jednostce Cummins (rys. 5.). Do wykonania tego elementu zastosowano azotek krzemu, co miało poprawić tolerancję wtryskiwacza UIS na zwiększoną zawartość sadzy w oleju smarującym w skutek wprowadzonych w 1988 roku w USA ograniczeń emisji. Dodatkowo Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> zapewniał lepszą odporność na ścieranie zwiększając niezawodność układu. Poprzez zastąpienie tego jednego elementu, dwukrotnie wydłużył się przebieg po jakim konieczna była regulacja wtryskiwacza UIS. W ciągu 11 lat od chwili wprowadzenia wyprodukowano 2 mln łączników oraz nie zanotowano ani jednego incydentu związanego z uszkodzeniem tego elementu [8].



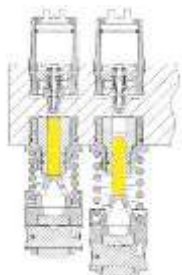
Rys. 5. Wtryskiwacz UIS Cummins i wykonany z Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> łącznik [8]

### 2.2. Pompa wysokiego ciśnienia

Ze względu na znaczną wrażliwość układu zasilania na jakość paliwa, zauważono zwiększoną częstotliwość zacierania się tłoczków pompy w sezonie zimowym. Problem stał się jeszcze bardziej zauważalny wraz z powszechnym zmniejszeniem zawartości siarki w oleju napędowym. Badania pokazały, że główną przyczyną występowania tego zjawiska była obecność wody w paliwie. Czas pracy do uszkodzenia podczas testu trwałościowego na paliwie zawierającym 1% wody wynosił jedynie kilkanaście godzin. Podejmowano próby poprawienia geometrii tłoka oraz utwardzenia powierzchni różnych materiałów stalowych, jednak nie przynosiło to satysfakcjonujących rezultatów. Od pary precyzyjnej wymaga się,

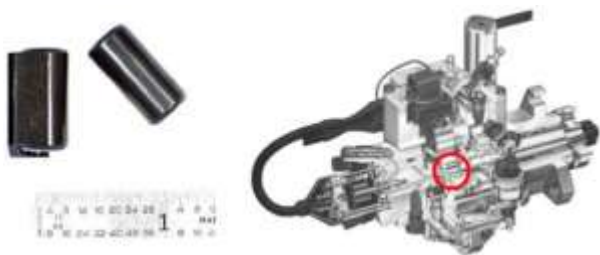


aby luz promieniowy pomiędzy tłoczkiem, a cylindrem był utrzymywany na stałym poziomie niezależnie od warunków pracy takich jak temperatura czy ciśnienie. Ze względu na niski współczynnik rozszerzalności cieplnej stosowany wcześniej azotek krzemu nie może być użyty w tym zastosowaniu. Bardziej odpowiednim materiałem jest tutaj ceramika cyrkonowa. Jako jedna z pierwszych ceramiczne tłoki zastosowała amerykańska firma Standadyne (rys. 6). Przeprowadzono również badania trwałościowe, które wykazały, że układy z ceramicznymi nurnnikami wytrzymują ponad 300 godzin pracy na paliwie zawierającym nawet 2 % wody.



**Rys. 6.** Zastosowanie ceramicznych tłoczków w sekcjach tłoczących pompy Standadyne [8]

Innym elementem pompy wysokiego ciśnienia do którego wykonania idealnie nadaje się ceramika jest rolka (rys. 7.) przekazująca napęd z krzywki na tłoczek. Tutaj podobnie jak w przypadku nurnników, ceramikę inżynierską po raz pierwszy wykorzystwała firma Standadyne. W tym przypadku zastosowano azotek krzemu. Bardzo dobre właściwości przeciwzatarciowe tego materiału, pozwoliły zwiększyć niezawodność układów.



**Rys. 7.** Wykonane z azotku krzemu rolki napędowe w pompie Standadyne [8]

Azotek krzemu, dzięki wysokiej udarności i twardości, znalazł zastosowanie również w produkcji kulek zaworów zwrotnych. Dzięki o połowę mniejszemu ciężarowi niż w przypadku stali, zmniejszone zostały siły uderzenia, dzięki czemu gniazdo ulega mniejszym odkształceniom zapewniając odpowiednią szczelność.

Ceramika, oprócz zastosowania jako samodzielny budulec całych elementów, może być wykorzystana powierzchniowo. Przykładem takiego zastosowania w układach paliwowych jest napylenie ceramiki na powierzchnię łożysk ślizgowych. Na rysunku 8 doskonale widać jasne zabarwienie powierzchni tulei na którą naniesiono warstwę ceramiki. Taki zabieg pozwala zmniejszyć współczynnik tarcia oraz zapewnić odpowiednią trwałość.



**Rys. 8.** Krzywka z napyloną warstwą ceramiczną na tulei ślizgowej

## PODSUMOWANIE

Rozwój inżynierii materiałowej obserwowany na przestrzeni ostatnich lat sprawia, że konstrukcje układów paliwowych stają się bardziej odporne na niskie właściwości smarne współcześnie stosowanych paliw. Dużym potencjał w dalszym rozwoju układów wtryskowych stwarza zastosowanie na szeroką skalę ceramiki inżynierskiej, która dzięki właściwościom znacznie przewyższającym obecnie wykorzystywane materiały stalowe wpływa korzystnie na trwałość zespołów.

Oprócz wymienionych w pracy przykładów, możliwe jest jeszcze szersze zastosowanie ceramiki. Wykonanie z ceramiki końcówki i iglicy rozpylacza spowolni proces jego zużycia, co zapewni niezmienną parametrów wtrysku przez dłuższy okres czasu. Innym przykładem może być wykonanie całej pary precyzyjnej z ceramiki co będzie konieczne, w przypadku dalszego zwiększania ciśnienia wtrysku.

Przeszkodą w zastosowaniu ceramiki na większą skalę jest zwiększony koszt produkcji podyktowany koniecznością wykorzystania wysokogatunkowych wyrobów o niskiej kruchości. Jednak nowe procesy produkcyjne zauważalnie ten koszt obniżają.

## BIBLIOGRAFIA

1. Kałdoński T., *Badanie i modelowanie procesów zużycia ściernego hydraulicznych par precyzyjnych*, WAT, Warszawa 2008.
2. Dobrzański L.A., *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2006.
3. Dobrzański L.A., *Zasady doboru materiałów inżynierskich z kartami charakterystyk*, Wydanie II, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
4. Leda H., *Współczesne materiały konstrukcyjne i narzędziowe*, Wydanie I, Wydawnictwo PP, Poznań 1996.
5. Marshall D.B., Evans A.G., Khuri Yakub B.T., Thien J.W. Kino G.S., *Proceedings of The Royal Society of London*, A385, Londyn 1983.
6. Scott M.G., *International Material Science*, 1985
7. Lewis M.H., *Ceramics: applications and limitations*. *Proceedings: Materials at their Limits*, Birmingham 1985.
8. Mandler W.F., Younshonis T.M., *Application of ceramics to high pressure fuel system*,

### Application of advanced ceramics in combustion engine's fuel supplying system

*The article presents the factors influencing the direction in which goes the development of internal combustion engines, which undeniably is to reduce the negative impact on the environment. It is currently minimized, inter alia, by increasing the fuel injection pressure. But the high pressure generated by modern injection systems make previously used materials do not provide adequate stability. It becomes necessary to use more advanced materials that article briefly characterized, and provides examples of their use in fuel systems.*

Autorzy:

prof. dr hab. inż. **Marek Idzior** – Politechnika Poznańska, ISSIT  
dr inż. **Wojciech Karpiuk** – Politechnika Poznańska, ISSIT  
mgr inż. **Rafał Smolec** – Politechnika Poznańska, ISSIT  
mgr inż. **Mateusz Bor** – Politechnika Poznańska, ISSIT