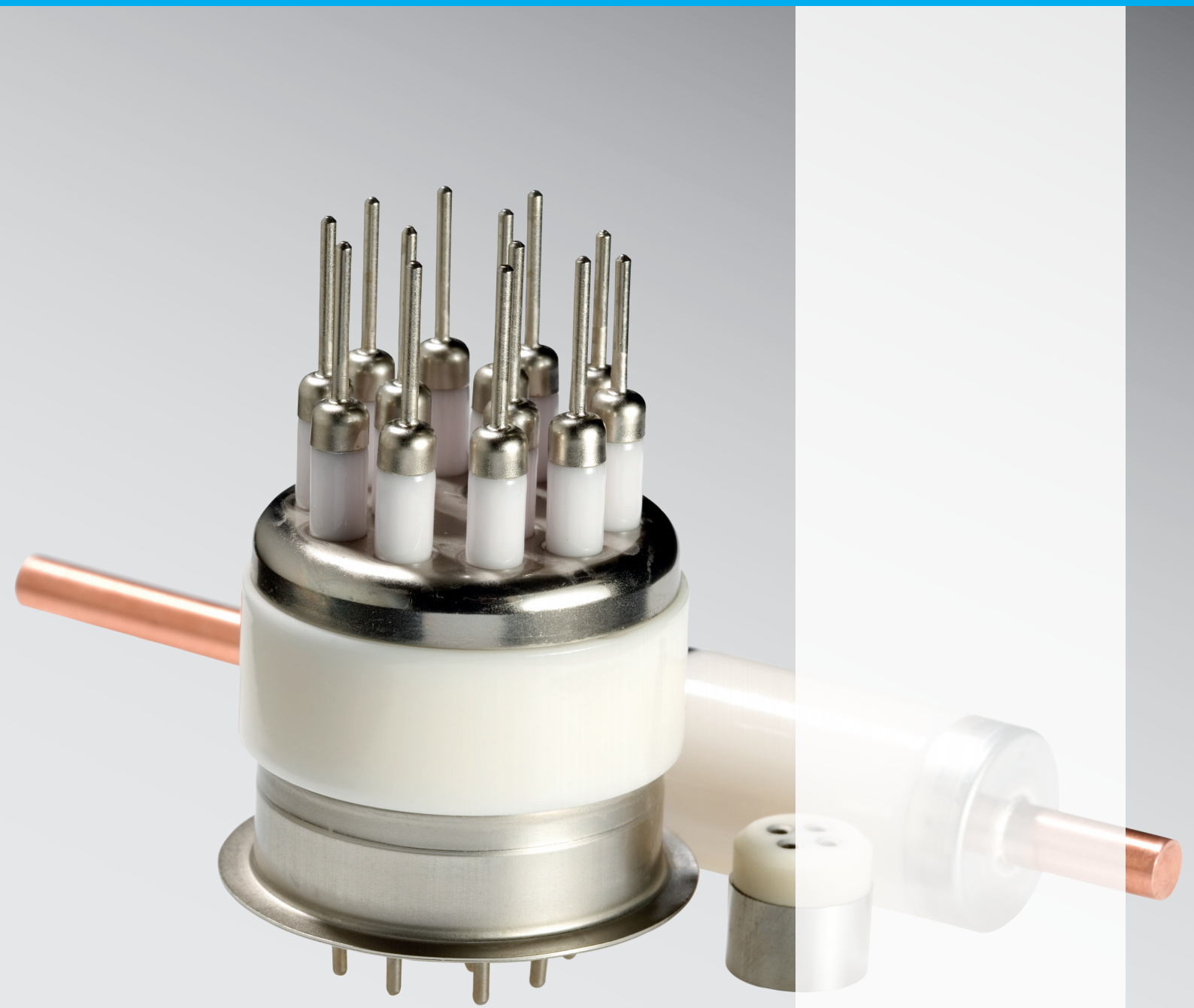
Dokument Techniczny | Kwiecień 2014
Dipl.-Min. Helmut Mayer

FRIALIT®-DEGUSSIT®
Ceramika Tlenkowa

Przepusty elektryczne i elementy izolacyjne

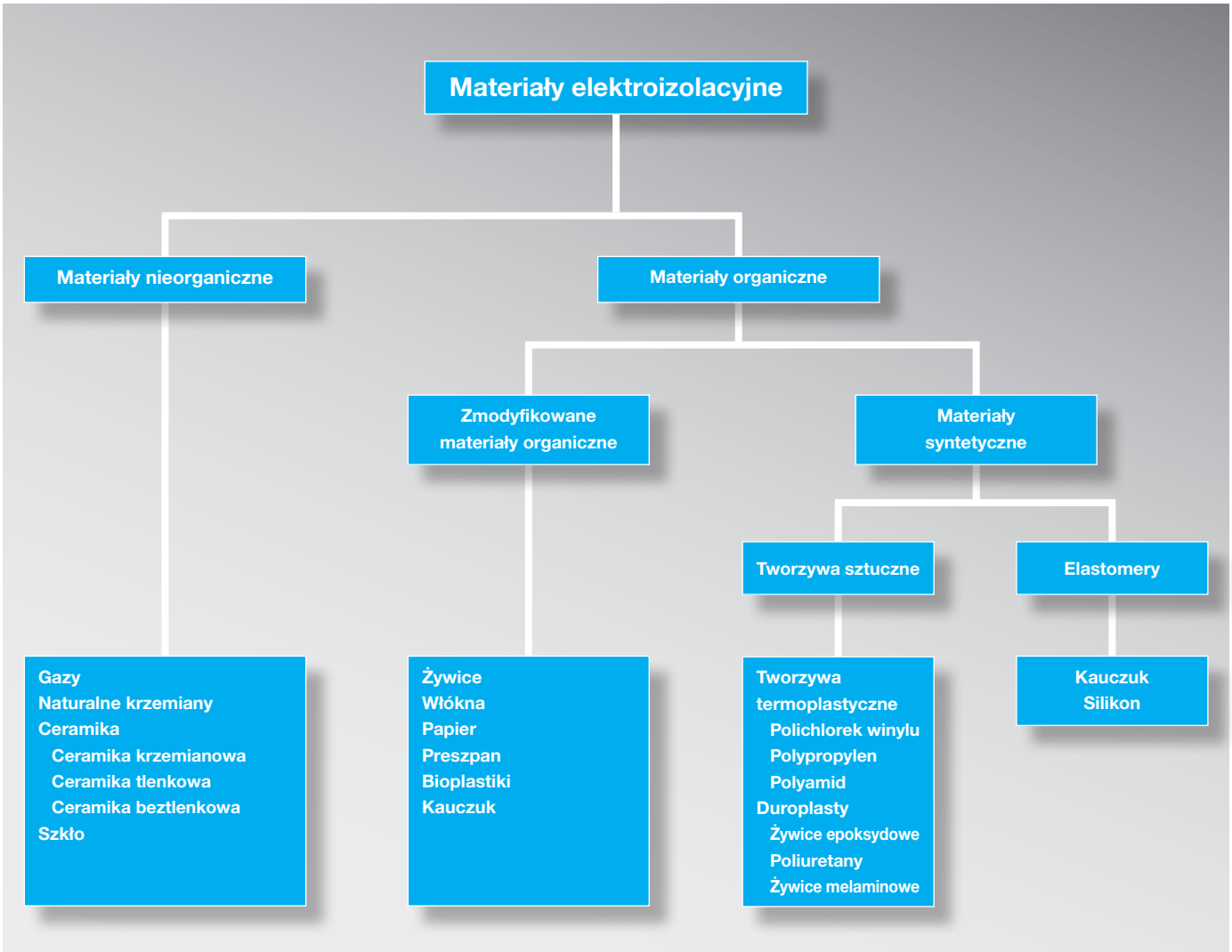


FRIATEC

1. Wstęp

Przepusty elektryczne i elementy izolacyjne zapewniają prawidłowe funkcjonowanie wielu urządzeń produkcyjnych oraz instalacji technicznych. Elementy tego typu mogą być wykonane z szerokiej gamy materiałów izolacyjnych. Ceramika tlenkowa stanowi jedynie niewielki fragment całego spektrum dostępnych materiałów, co ilustruje Rysunek 1. Dlatego ceramika tlenkowa stosowana jest przeważnie tam, gdzie występuje zapotrzebowanie na ponadprzeciętne właściwości materiału, które nie mogą być zaspokojone przez inne, tańsze materiały. Jednym z takich przykładów może być zapotrzebowanie na wysoki poziom oporności elektrycznej wraz z wytrzymałością mechaniczną, w temperaturze pracy powyżej 500 °C, z jednoczesną odpornością na szybkie zmiany temperatury. W takim przypadku jedynym odpowiednim materiałem izolacyjnym spełniającym te wymagania jest tlenek glinu.

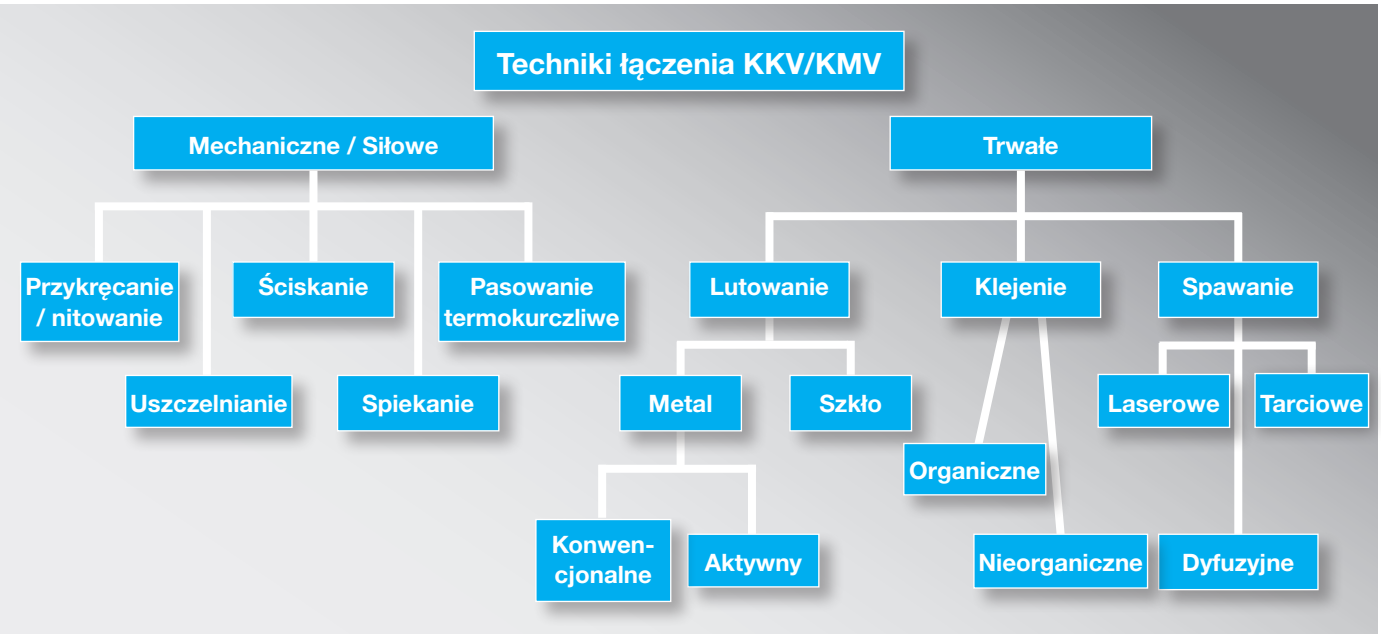
Poza nielicznymi wyjątkami, istotne znaczenie w użyciu elementów izolacyjnych mają zwarte i próżnioszczelne łączenia ceramiki tlenkowej z metalami. Poniżej przedstawiono dostępne dzisiaj, różne techniki łączenia tych materiałów.



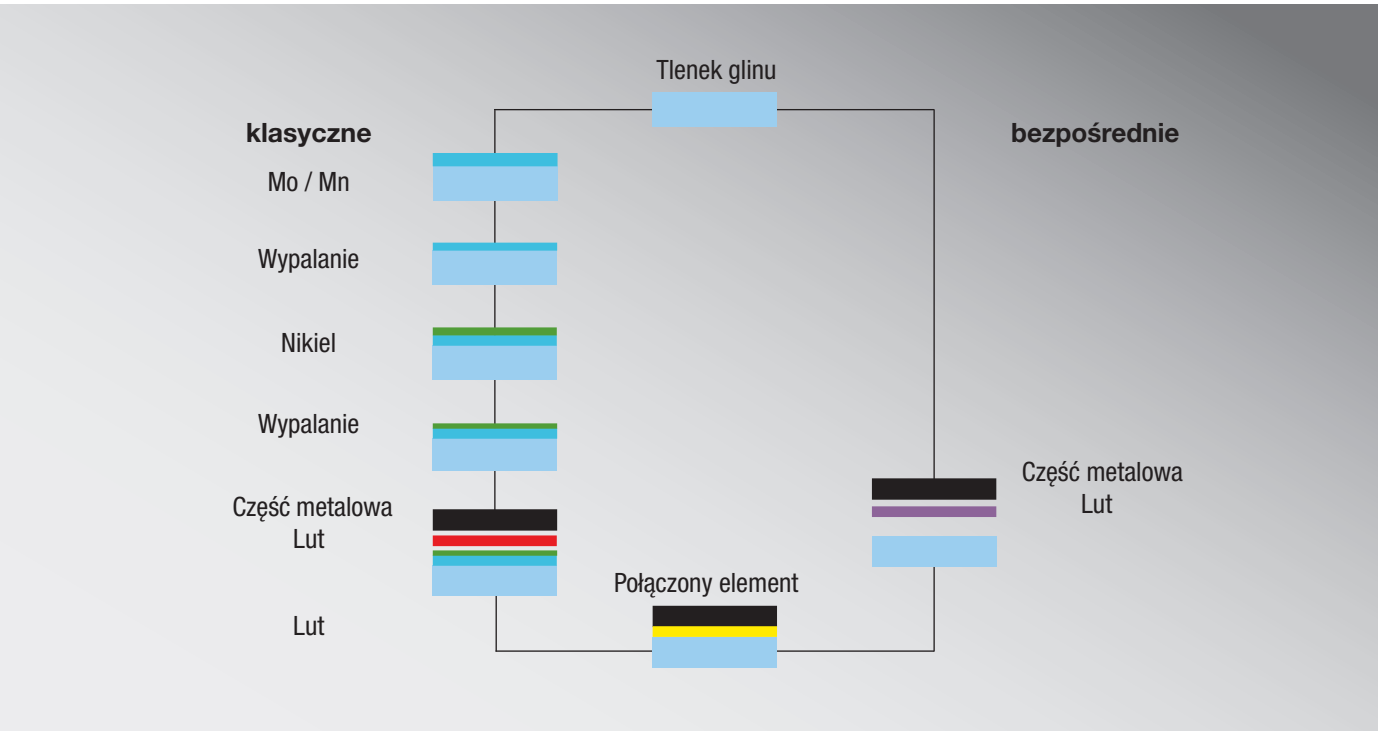
Rysunek 1: Materiały elektroizolacyjne

2. Techniki łączenia

Rysunek 2 [1] przedstawia schemat poglądowy powszechnie stosowanych dzisiaj technik łączenia ceramiki z metalami i ceramiki z ceramiką. Procedura z wykorzystaniem MoMn w zwartych, gazoszczelnych połączeniach do wysokiej próżni opiera się na badaniach rozwojowych sięgających pierwszej połowy ubiegłego wieku [2, 3, 4]. Alternatywna metoda bezpośredniego lutowania aktywnego stała się w ostatnich czasach bardziej możliwa, głównie dzięki większej dostępności odpowiednich lutów, ale nadal używana jest w ograniczonym zakresie. Obie te techniki łączeń zestawione zostały na Rysunku 3 [1].



Rysunek 2: Techniki łączenia

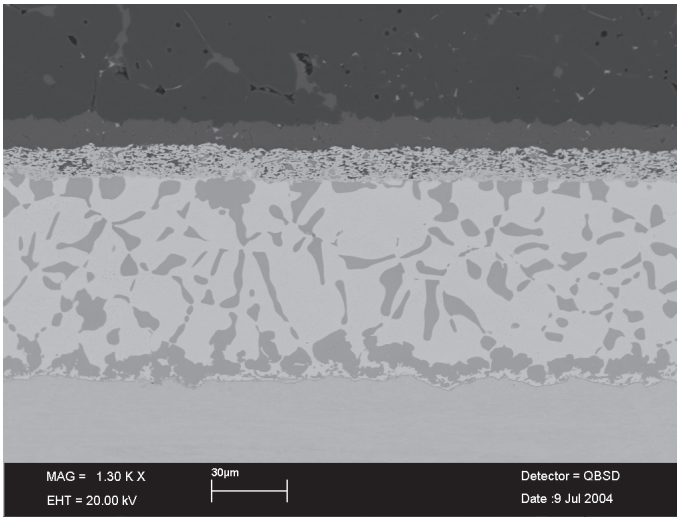


Rysunek 3: Techniki łączenia konwencjonalnego i łączenia bezpośredniego aktywnym lutowaniem ceramiki Al_2O_3 z metalami

2.1 Lutowanie ceramiki z metalizacją MoMn

Procedura MoMn oparta jest na zawiesinie nieorganicznego, sproszkowanego składnika w organicznym spoiwie. Zawiesina ta nakładana jest na powierzchnię ceramiki pędzlem bądź sitodrukiem i poprzez proces wypalania tworzy warstwę metalizacji szczelnie przylegającej do powierzchni [5, 6].
Ponieważ większość dostępnych lutów do próżni nie zwilża metalizacji, pokrywa się ją dodatkowo cienką warstwą 2 – 5 µm niklu poprzez galwanizację lub elektrolizę. Tak przygotowany element ceramiczny jest następnie lutowany z dopasowanym elementem metalowym w atmosferze redukcyjnej lub w próżni o wystarczająco niskim ciśnieniu resztkowym. Standardowo do procesu lutowania używa się eutektycznej mieszaniny srebra i miedzi.

Rysunek 4a przedstawia przekrój poprzeczny strefy łączenia kompozytu ceramiki korundowej 99,7 % Al_2O_3 / AgCu28 / Mo. Takie łączenie materiałów pozwala na osiągnięcie wytrzymałości ponad 200 MPa, w próbie na rozciąganie [8], w temperaturze pokojowej.
Z rosnącym zapotrzebowaniem na elementy łączone mogące pracować w wysokiej temperaturze i środowiskach korozyjnych stosuje się luty niezwilżające o podwyższonym punkcie topnienia. W Tabeli 1 [7] zestawiono tego typu luty.



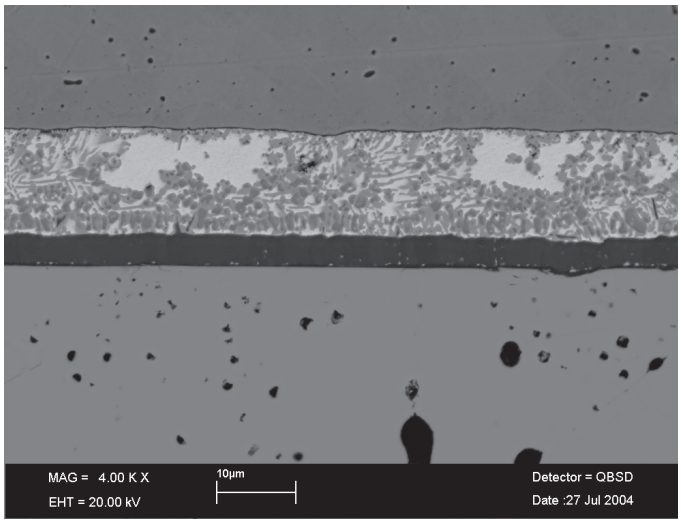
Rysunek 4a: Przekrój poprzeczny metalizowanej i lutowanej ceramiki tlenkowej Al_2O_3

Materiał lutujący	Przedział topnienia (°C)
Ag Cu 28	780
Ag Cu 26,6 Pd 5	807 - 810
Ag Cu 21 Pd 25	910 - 950
Au Ni 18	950
Cu Ge 10	900 - 1000
Au Cu 65	1000 - 1020

Tablica 1: Wybór lutów do próżni

2.2 Lutowanie aktywne

Metoda ta oparta jest na zastosowaniu lutów o niskiej zawartości metali, takich jak: Ti, Zr, Hf. Nawilżają one ceramikę Al2O3 co oznacza, że wcześniejszy proces metalizacji nie jest wymagany. Łączenia na działających bezpośrednio lutach aktywnych: ceramika Al_2O_3 / związki Ni42, osiągają zbliżone wartości wytrzymałości w porównaniu do łączeń wstępnie metalizowanych i następnie lutowanych [9,10]. Na Rysunku 4b widoczny jest przekrój poprzeczny połączenia ceramiki cyrkonowej ZrO_2 z elementem stalowym lutowanym związkami AgCu26 i 5Ti3. Pomimo że lutowanie aktywne jest atrakcyjnym rozwiązaniem z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia, należy pamiętać, że głównie w przypadku przepustów elektrycznych , spoiwo lutownicze nie wpływa całkowicie do szczeliny lutowniczej a pozostaje w miejscu depozytu lutowia. Istnieją jednak sposoby na ograniczenie tego zjawiska przy konstrukcjach uwzględniających tę specyfikę.



Rysunek 4b: Przekrój poprzeczny lutowanej aktywnie ceramiki cyrkonowej ZrO_2

3. Dobór materiałów i konstrukcji

Około 70% różnych kosztów produkcji powstaje już na samym etapie konstruowania [11]. Wielkość ta wywodzi się z przemysłu samochodowego i może być odniesiona do przepustów elektrycznych i izolatorów wysokoprądowych tylko z dodatkowymi zastrzeżeniami. Pokazuje ona jednak, że sam etap projektowania konstrukcji elementu przy jednoczesnym utrzymaniu konkurencyjnych kosztów wytwarzania, w dużym stopniu odpowiada za dostarczenie finalnego produktu spełniającego wymagania klienta.

W szczególności oznacza to, że:

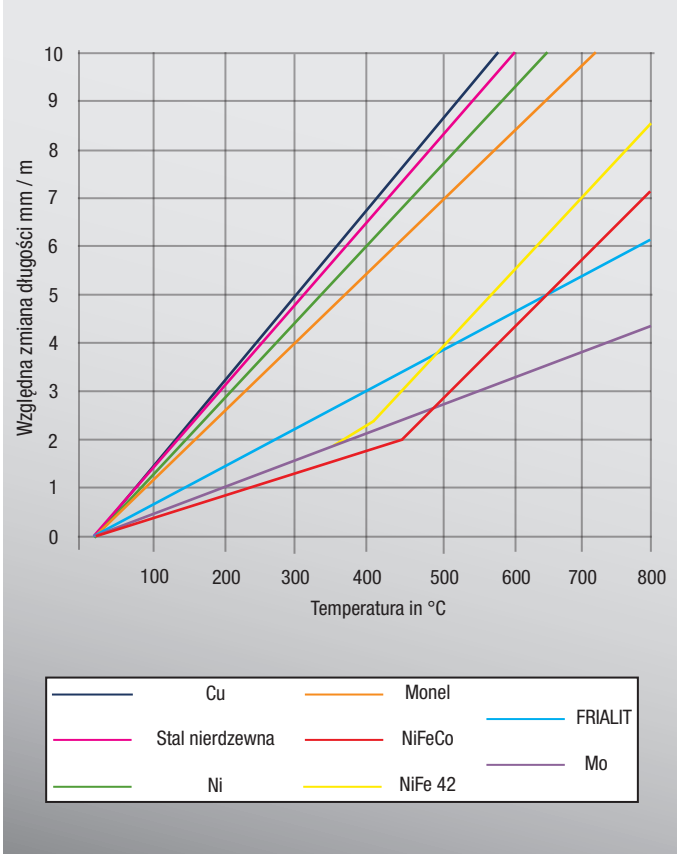
a) należy realizować wymagane produkty przy użyciu najprostszych możliwych rozwiązań i standardowych produktów wyjściowych
b) konstrukcje należy zaadoptować pod materiał ceramiczny
c) konstrukcja powinna być odpowiednio uproszczona pod produkcję.

Początkowy wybór właściwego materiału ceramicznego i łączonego z nim metalu wymaga szczegółowej znajomości i analizy warunków pracy elementu. Tabela 3 przedstawia przegląd podstawowych wymagań w trzech obszarach łączeń kompozytu: ceramika, spoiwo, metal.

Projekt konstrukcji łączenia odbywa się zgodnie z geometrycznymi specyfikacji użytkownika przy jednoczesnym spasowaniu termicznym wybranych materiałów (Wykres 5).

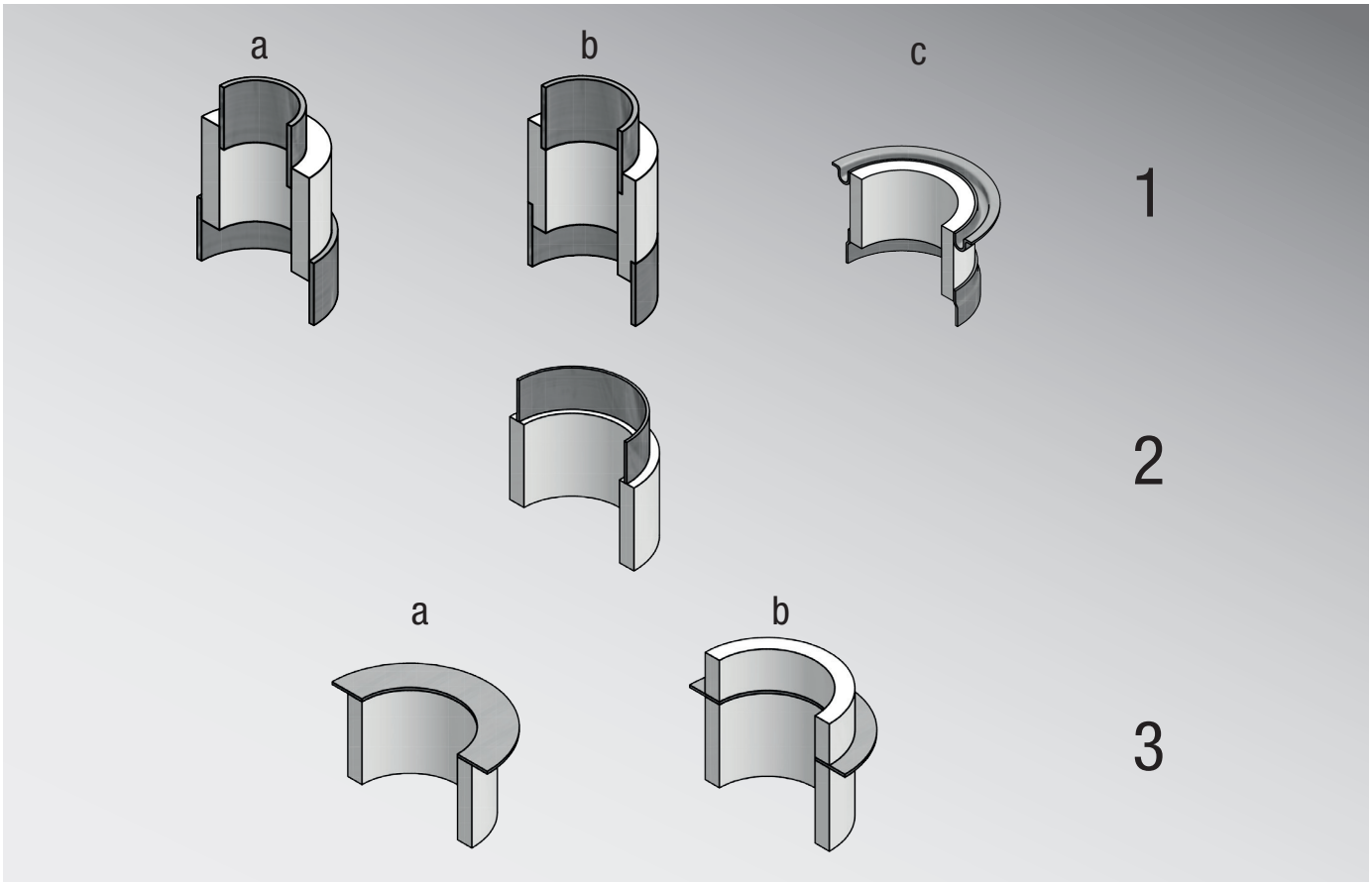
Właściwości	Obszar zainteresowania:		
	Ceramika	Obszar łączenia	Metal
Elektryczne:			
Napięcie niszczące	+		
Napięcie przebicia	+		
Droga upływu	+		
Stała dielektryczna	+		
Rezystywność	+		
Magnetyczne			+
Termiczne:			
Temperatura pracy		+	
Określenie szoku termicznego		+	
Mechaniczne:			
Wytrzymałość		+	
Geometryczne:			
Tolerancje wymiarów			
Chropowatość powierzchni	+		+
Poziom szczelności: Hel		+	

Tabela 2: Główne wymagania



Wykres 5: Rozszerzalność cieplna metali w porównaniu z ceramiką tlenkową Al_2O_3

Rysunek 6 pokazuje kilka podstawowych sposobów łączenia materiałów, które są często wykorzystywane w konstrukcjach przepustów elektrycznych i w elementach izolacyjnych.
Tam gdzie jest to możliwe, łączenie ceramiki z metalem jest przeprowadzane w taki sposób, aby lutowany element metalowy, przenosił obciążenia ściskające na ceramikę, ponieważ materiały ceramiczne wykazują wysoką wytrzymałość przy tego typu obciążeniach. Najbliższy temu sposobowi łączenia materiałów jest przykład konstrukcji 1. W przypadku lutowania po obwodzie zewnętrznym ceramiki, preferowanymi materiałami są specjalnie dopasowane materiały kompozytowe (Ni42, NiCo 2918), lub metale, których współczynniki rozszerzalności cieplnej są wyższe od współczynników użytej ceramiki. Dopasowane materiały kompozytowe nadają się również do lutowania po obwodzie wewnętrznym ceramiki jednak w tym przypadku współczynnik rozszerzalności cieplnej powinien być niższy od współczynnika materiału ceramicznego. Wyjątkiem są metale, takie jak miedź, które mogą być stosowane zarówno od wewnątrz i na zewnątrz obwodu lutowania, pomimo wysokich wartości współczynników rozszerzalności cieplnej, ponieważ ze względu na swoją wysoką ciągliwość materiały te mają zdolność do redukcji naprężeń powodujących pęknięcia w obszarze łączenia.
Przy procesie lutowania po zewnętrznym obwodzie, na zewnętrznej styku ceramiki i metalu pojawiają się nie tylko promieniowe naprężenia ściskające ale również naprężenia ścinające i rozciągające powstałe w skutek różnego, osiowego kurczenia się materiałów w trakcie chłodzenia od temperatury lutowania. Jednak naprężenia te są pomijalne gdy stosowane są dopasowane kompozyty lub ciągliwe metale o grubościach ścianek mniejszych niż 1 mm.
By móc pracować na kilku rodzajach plastycznych metali jak np. stal austeniczna, grubość ścianki metalu na powierzchni lutowania jest często zredukowana do kilku dziesiątych milimetra. Pozwala to na zwiększenie elastyczności mechanicznej części metalowej. Działanie to pozwala na lutowanie części metalowych o średnicach do około 10 mm bez uszkodzenia ceramiki. Większe średnice wymagają zastosowania dodatkowej, bardziej elastycznej kształtki. Jeżeli mogą to być elementy magnetyczne, kołnierz typu 1c może być przylutowany lutem np. Ni42 i ewentualnie następnie zlutowany z częścią stalową. W przypadku gdy lutowanie przeprowadza się po obwodach wewnętrznym lub zewnętrznym obydwu końców rury ceramicznej najczęściej nacina się odpowiednie rowki w materiale ceramicznym (typ 1b). Takie działanie przyczynia się do powstawania dodatkowego karbu, jednak zjawisko to może być kontrolowane poprzez zastosowanie dostatecznie dużych promieni w obszarze rowków, szczególnie gdy stosuje się dopasowane stopy metali lub metale plastyczne.
Zaletą takiego rozwiązania jest to, że pozwala ono na bardzo niski koszt lutowania przy ograniczeniu osprzętu lutowniczego i prosty montaż poszczególnych, lutowanych elementów. Jednak w tym wypadku wymagana jest dodatkowa obróbka ceramiki i korzyści kosztowe mogą być zniwelowane wzrostem wymiarów ceramicznych elementów konstrukcyjnych i / lub małą liczbą elementów.



Rysunek 6: Podstawowe typy konstrukcji łączeń

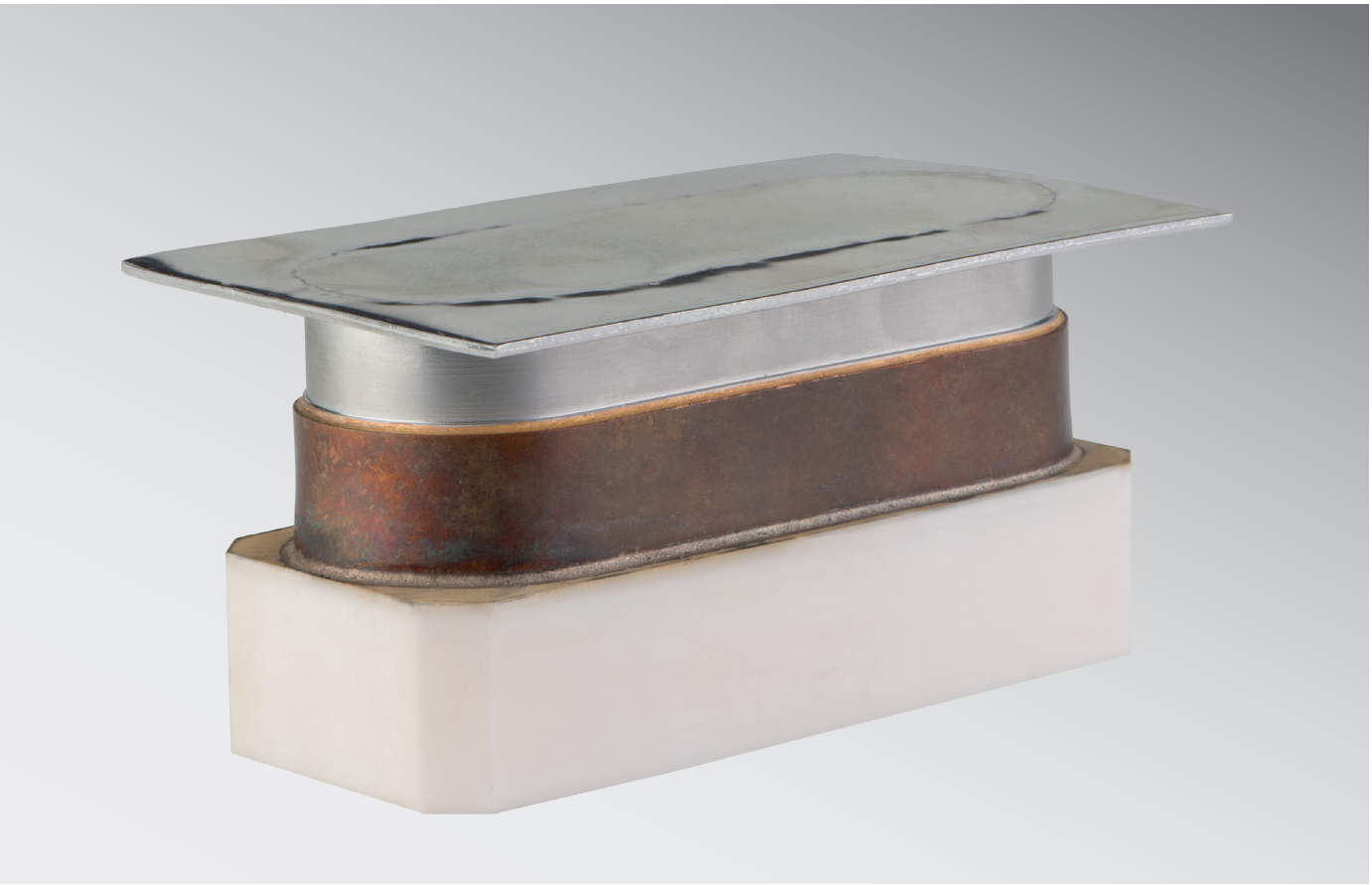
Konstrukcja typu 1 jest często ograniczona do lutowania średnic mniejszych niż 50 mm w przypadkach niespasowanych metali, ponieważ różnice współczynników rozszerzalności cieplnych ceramiki i metali w temperaturze lutowania mogą spowodować powstawanie szczelin, które można następnie wypełnić lutem ale przy zwiększonych kosztach procesu. Przykładowo przy lutowaniu osiowo symetrycznych rur z ceramiki Al_2O_3 z rurą miedzianą, przy średnicach 100 mm i temperaturze lutowania 800°C ze względu na różnice współczynników rozszerzalności cieplnej powstaje szczelina wielkości 0,4 mm.

W tych wypadkach często stosuje się konstrukcję typu 2. To samo odnosi się do lutowania większych części metalowych ze stali nierdzewnej poprzez pośredniczącą, ciągliwą warstwę miedzi, ponieważ tego typu konstrukcja pozwala na dużą ruchliwość części metalowej na przedniej powierzchni ceramiki. Przykład takiej konstrukcji widoczny jest na Rysunku 7. Ten rodzaj konstrukcji zwiększa cechy wytrzymałościowe ceramiki, gdyż w strefie łączenia występują tylko naprężenia rozciągające. Z punktu widzenia kosztów produkcji, oprzyrządowanie do lutowania musi być bardziej złożone niż dla typu 1,aby zapewnić wąskie tolerancje wymiarowe. Chociaż ma to sens by część metalowa była wyśrodkowana na ceramice bez użycia dodatkowych elementów pośredniczących ale w takim procesie koszty byłyby wygórowane z wyjątkiem produkcji dużych ilości elementów.

Konstrukcje typu 1 i 2 nie zawsze są odpowiednie ponieważ w niektórych przypadkach warunki instalacji wymagają kompaktowych rozmiarów danego komponentu. Przy takich wymaganiach stosuje się płaskie lutowanie według konstrukcji typu 3. W tego typu konstrukcji ceramika poddawana jest działaniom sił ścinających i ciągnącym. Szczególnie w tego typu łączeniach, strefa łączenia musi wytrzymać maksymalne obciążenia leżąc wyżej niż w konstrukcji typu 2 dlatego w tym wypadku używa się tylko dopasowane stopy metali i metale ciągliwe.

W celu zwiększenia bezpieczeństwa takiego mechanicznego łączenia stosuje się dodatkowy, ceramiczny pierścień lutowany według konstrukcji typu 3b.

Pierścień ten zmusza metalowy element do kurczenia promieniowo i symetrycznie podczas procesu chłodzenia od temperatury lutowania, a tym samym powoduje zmniejszenie naprężeń rozciągających w strefie łączenia.



Rysunek 7: Ceramika tlenkowa Al_2O_3 lutowana ze stalą austetyczną z warstwą miedzi według typu 2

4. Przykłady zastosowań

Przepusty elektyczne i elementy izolacyjne stosuję się m.in. w następujących obszarach:

Inżyniera Elektryczna

- Przepusty z pojedynczymi pinami i przepusty wielopinowe
- Przepusty wysokociśnieniowe do technologii offshore i lądowej
- Rury izolacyjne do cieczy, gazów i ultra wysokiej próżni
- Separatory gwintowane i izolatory wsporcze
- Komponenty do technologii akceleratora cząstek
- Elementy czujników ciśnienia, temperatury, tlenu, soli itd.

Technologia kontroli i pomiaru

- Zakończenia kablowe do termopar i elementów grzejnych
- Hermetyczne przepusty do pomiaru przepływu i poziomu
- Obudowy czujników magnetycznych ustawników pozycyjnych

Technologia medyczna

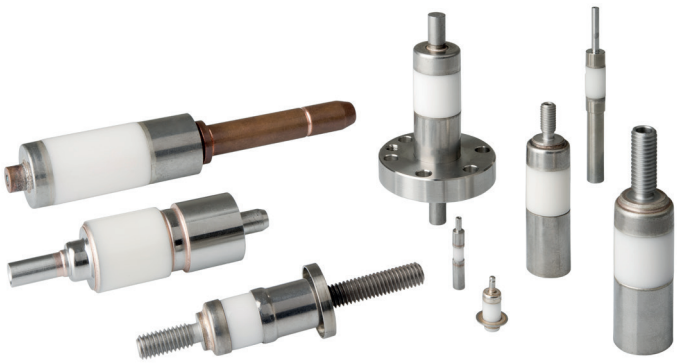
- Obrotowe lampy rentgenowskie w tomografii komputerowej
- Wzmacniacze obrazu X-Ray w radiologii

Technologia akceleratora cząstek

- Komora dipolowa, komora kwadrupolowa i komora kickera do uginania i skupiania wiązek ciężkich jonów
- Okna sprzęgające w wysokich częstotliwościach
- Izolatory wysokonapięciowe, izolatory segmentowe w akceleratorach DC
- Metalizowana ceramika do stochastycznego chłodzenia wiązki cząstek o wysokich energiach

Technologia próżniowa

- Przepusty eklektyczne do różnych napięć i prądów
- Izolatory instalacji i izolatory typu rura w rurze w inżynierii mechanicznej





Literatura

[1] Lugscheider, E., Krappitz, H., Boretius, M.: Fügen von Hochleistungskeramik untereinander und mit Metall. Technische Mitteilungen 80 (1987), 231 – 237

[2] Pulfrich, H.: Ceramic-to-Metal Seal. US Pat. No. 2,163,407 (1939)

[3] Meyer, A.: Zum Haftmechanismus von Molybdän/Mangan-Metallisierungsschichten auf Korundkeramik. Ber. DKG 42 (1965), 405 – 444 und 452 – 454

[4] Nolte, H.J., Spurck, R.F.: Metal-Ceramic Sealing with Manganese. Television Eng. 1 (1950), 14 – 18

[5] Helgesson, C.J.: Ceramic-to-Metal Bonding. Technical Publishers Inc. Cambridge, Mass. (1968)

[6] Twentyman, M.E.: High-Temperature Metallizing, Parts 1-3. J. Mater. Sci: 10 (1975), 765 – 798

[7] Fa. Demetron GmbH: Firmenschrift Vakuumhartlote

[8] DVS-Merkblatt 3101: Bestimmung der Haftfestigkeit von hartlotfähig metallisierter Keramik durch Zugprüfung

[9] Turwitt, M.: Bending Test for Active Brazed Metal/Ceramic Joints – A Round Robin. CFI. Ber. DKG 71 (1994), 406- 410

[10] Boretius, M.: Aktivlöten von Hochleistungskeramiken und Vergleich mit konventionellen Lötverfahren. Technisch-wissenschaftliche Berichte der RWTH Aachen Nr. 33. 29.11.90 – 1991, 186 S.

[11] Witte, K.-W.: Montagegerechte Produktgestaltung – Gemeinsame Aufgabe für Konstruktion und Arbeitsvorbereitung. Praxishandbuch für den Betriebsleiter, Band 1, Teil 4/2.1 (1989), 1-4.

FRIATEC Aktiengesellschaft
Ceramics Division
Dipl.-Min. Helmut Mayer
Steinzeugstraße 50
68229 Mannheim
Phone: +49 621 486-1406
Fax: +49 621 486-251406
helmut.mayer@friatec.de
www.friatec.com

FRIATEC

an Aliaxis company