

Uszczelnianie szkła kwarcowego w środowisku wysokich temperatur

Metody, problemy i przykłady materiałów uszczelniających

1. Przegląd metod uszczelniania szkła kwarcowego

Jak omówiono wcześniej, metody uszczelniania można podzielić na:

Typ uszczelnienia	Przykłady metod	Zakres temperatur	Rozbieralność	Typowe zastosowania
Twarde (stałe)	Lutowanie aktywne, spieki	600–1100°C	NIE	Przepusty próżniowe, optyka
Miękkie (elastyczne)	Uszczelki metalowe, włókniste	do 800°C	TAK	Piece, przesłony, złącza robocze
Półstałe (kleje, szkliva)	Kleje ceramiczne, sol-gel	500–1200°C	NIE	Połączenia kwarc–ceramika/metale

2. Konkretnie przykłady materiałów uszczelniających

A. Uszczelki metalowe (miękkie)

Materiał uszczelki	Maks. temperatura pracy	Zgodność z kwarcem	Uwaga techniczna
Miedź OFHC	~500°C (próżnia)	Dobra	Używana z kołnierzami typu ConFlat
Srebro	~650°C	Dobra	Bardziej miękka niż miedź
Inconel (sprężynujące)	~1000°C	Ograniczona	Trudniejsza do dopasowania mechanicznego

Miękkie metale dobrze przylegają do gładkich powierzchni szkła kwarcowego (lub jego metalowych kołnierzy), zapewniając gazoszczelność.

B. Kleje i masy ceramiczne (półstałe)

Nazwa handlowa lub typ	Temp. maks.	Skład główny	Kompatybilność z kwarcem	Uwagi
Resbond 940	1650°C	Tlenek glinu (Al_2O_3)	Bardzo dobra	Odporny chemicznie, stosowany w próżni
Aremco Ceramabond 552	1425°C	Krzemionka (SiO_2)	Doskonała	Specjalnie do połączeń kwarcowych
Aremco Ceramabond 569	870°C	Borokrzemian	Dobra	Nadaje się do metali i ceramiki
Sauereisen 31	1370°C	Tlenki metali (MgO , Al_2O_3)	Dobra	Stosowany do atmosfer ochronnych

Kleje ceramiczne oferują odporność na temperaturę i środowisko, ale są **kruche** i nieodporne na naprężenia mechaniczne.

C. Kleje sol-gel (krzemionkowe)

Typ kleju	Temp. maks.	Skład główny	Kompatybilność z kwarcem	Uwagi
Sol-Gel SiO ₂	800–1000°C	Tetraetyloortokrzemian (TEOS)	Bardzo dobra	Tworzy cienką, szklaną spoinę
Sol-Gel ZrO ₂	900–1200°C	Czwartorzędowe związki cyrkonu	Ograniczona	Dobre dla połączeń z tlenkami

Sol-gel pozwala na nanoszenie cienkich, szklistych powłok o dobrej przyczepności. Odpowiedni do lekkich połączeń kwarc–ceramika.

D. Luty aktywne (do metali)

Stop lutowniczy	Temp. pracy	Skład	Kompatybilność	Uwagi
Ag–Cu–Ti (BTi-5)	~850°C	63% Ag, 35% Cu, 2% Ti	Bardzo dobra	Powszechny do połączeń szkło–metal
Cu–Sn–Ti	~950°C	88% Cu, 10% Sn, 2% Ti	Dobra	Taniej niż Ag–Cu–Ti
Au–Ni–Ti (dla high-end)	~950°C	82% Au, 16% Ni, 2% Ti	Doskonała	Bardzo kosztowna, precyzyjna

Lutowanie aktywne wymaga **próżniowego lub ochronnego środowiska** i dobrze przygotowanej, czystej powierzchni szkła kwarcowego.

3. Typowe problemy i sposoby ich ograniczenia

Problem	Przyczyna	Potencjalne rozwiązanie
Pękanie spoiny	Różnice rozszerzalności cieplnej	Użycie warstw pośrednich (np. Mo, W), lut aktywny
Nieszczelność po nagrzaniu	Degradacja kleju, odprężenia	Odpowiedni dobór temperatury pracy i materiału
Reakcje chemiczne	Utlenianie, dyfuzja składników	Pasywacja, zastosowanie barier ceramicznych
Mikropęknięcia po cyklach	Zmęczenie termiczne materiału	Unikanie gwałtownych zmian temperatury
Trudność w montażu	Brak dopasowania mechanicznego i chemicznego	Obróbka powierzchni, stosowanie uszczeltek elastycznych

4. Zalecenia praktyczne przy projektowaniu połączeń kwarcowych

- **Zawsze uwzględnij rozszerzalność cieplną** – szkło kwarcowe najlepiej łączyć z metalami o niskiej CTE (np. molibden, tantal).
- **Unikaj ostrych krawędzi i punktów naprężeń** – ułatwia to kompensację naprężeń cieplnych.
- **Wybieraj masy uszczelniające zgodnie z atmosferą pracy** – nie wszystkie kleje są odporne na tlen, próżnię czy gazy redukujące.
- **Testuj szczelność po montażu i po wygrzewaniu** – wiele spoin wykazuje problemy dopiero po cyklu grzewczym.