Swagelok®

Central Fluidsystems



# Budowa złączy do instalacji wodorowych

Chuck Hayes, główny inżynier ds. rozwiązań transportowych, Swagelok




# Budowa złączy do instalacji wodorowych

## Streszczenie:

Jednym z najpoważniejszych wyzwań w rozwoju bezpiecznych, niezawodnych i szczelnych systemów pojazdów i infrastruktury opartych na wodorowych ogniwach paliwowych jest natura samego wodoru. Wodór jest gazem o małych cząsteczkach, które potrafią z łatwością przenikać przez najmniejsze szczeliny i przedostawać się do materiałów przeznaczonych do ich przechowywania. W branży transportowej wodór musi być przechowywany pod ciśnieniem przekraczającym 875 barów, aby osiągnąć niezbędną gęstość energii w pojeździe. Nagłe zmiany temperatury i ciśnienia na stacjach tankowania dodatkowo wpływają na integralność systemu, zwłaszcza w momencie, gdy wodór opuszcza zbiorniki magazynowe i ulega dekompresji.

Wszystkie te czynniki podkreślają kluczowe znaczenie niezawodności złączek, które łączą kluczowe elementy wysokociśnieniowych systemów paliw wodorowych. Obecnie dostępne są technologie montażu o zwiększonej wydajności, które gwarantują tę niezawodność. W niniejszym artykule przyjrzymy się konstrukcji złączki zapewniającej szczelność gazową, odpowiedni zacisk na rurze, odporność na wibracje, integralność materiału oraz efektywny montaż - cechy kluczowe dla technologii wodorowej.

# Krajobraz energetyczny czystego transportu

W obliczu globalnych wysiłków na rzecz ograniczenia emisji pochodzących z paliw kopalnych, kilka alternatywnych technologii paliwowych zyskuje na popularności zarówno w segmencie samochodów osobowych, jak i ciężarowych.
Pojazdy elektryczne oraz hybrydowe (EV) przyciągają znaczną uwagę. Większość czołowych producentów samochodów wprowadziła rozwiązania oparte na elektryfikacji, a niektórzy nowi gracze na rynku zdołali zdobyć jego znaczący udział.
Mimo rosnącej popularności pojazdów elektrycznych technologia ta wciąż boryka się z istotnymi ograniczeniami, które mogą utrudniać jej szerokie zastosowanie jako pełnoprawnej alternatywy dla pojazdów spalinowych:

## Zasięg

Pojazdy elektryczne mają zazwyczaj znacznie krótszy zasięg niż ich konwencjonalne odpowiedniki. Większość modeli może przejechać około 160 km na jednym ładowaniu, choć pojazdy o wyższej wydajności osiągają zasięg rzędu 300–500 km.1 W związku z tym transport długodystansowy, zwłaszcza towarowy, pozostaje w dużej mierze niekompatybilny z obecnie dostępną technologią akumulatorową.

## Długi czas ładowania

Ładowanie akumulatora pojazdu elektrycznego może trwać od 3 do 12 godzin, a „szybkie ładowanie" do 80% pojemności zajmuje nawet 30 minut. Nawet w przypadku modeli o większym zasięgu długi czas ładowania stanowi wyzwanie dla podróży na dalekie dystanse i efektywnego transportu towarowego.

## Wyższe koszty

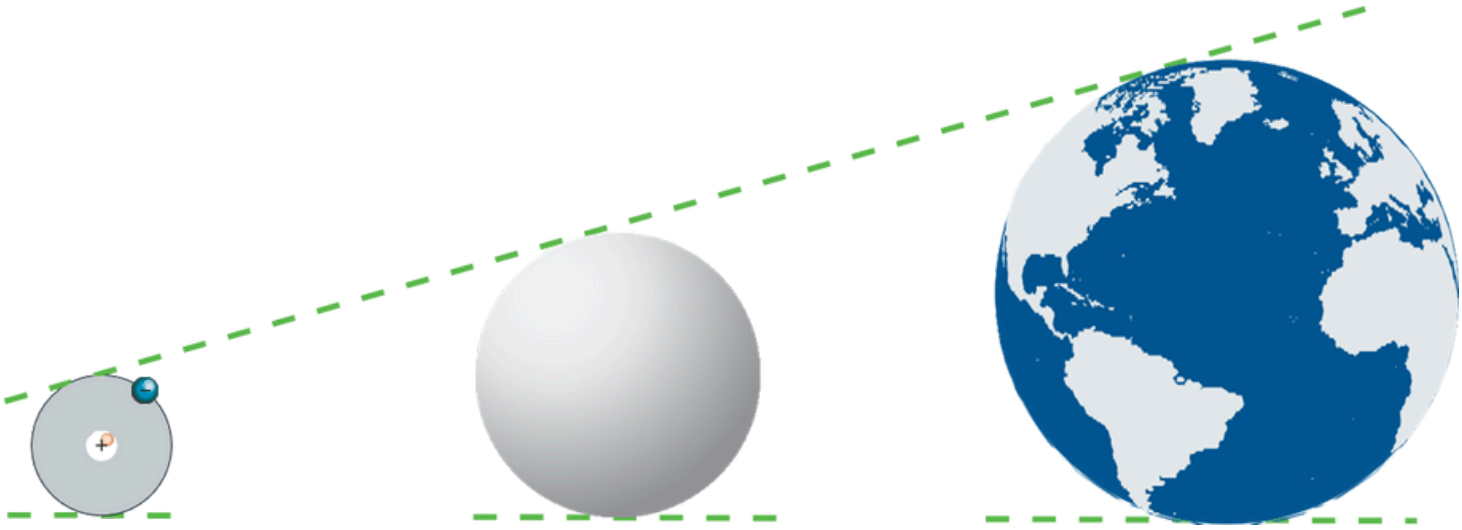
Obecne technologie produkcji akumulatorów są kosztowne, a ich żywotność wymaga dalszej poprawy. Konieczność częstej wymiany wiąże się z wysokimi kosztami i może negatywnie wpływać na środowisko.

Choć technologia napędu elektrycznego jest stale udoskonalana, istnieje już alternatywa, która pokonała te ograniczenia – pojazdy z wodorowymi ogniwami paliwowymi. Dzięki wysokociśnieniowemu magazynowaniu wodoru pojazdy te bez trudu osiągają zasięg przekraczający 500 km na jednym tankowaniu, a w przypadku transportu ciężarowego pełny zbiornik wodoru może zapewnić nawet do 1600 km zasięgu. Dodatkowo, ich tankowanie zajmuje średnio mniej niż cztery minuty. Ponadto, wykorzystują one zaawansowane technologie znane z pojazdów elektrycznych, takie jak hamowanie regeneracyjne, wysoki moment obrotowy oraz zmniejszona awaryjność.




Pojazdy wodorowe stanowią jedną z najbardziej obiecujących i opłacalnych technologii transportowych opracowanych do tej pory, zdolną do zapewnienia wydajności oczekiwanej przez kierowców przy jednoczesnym zapewnieniu wyraźnych korzyści dla środowiska. Aby jednak pojazdy napędzane wodorowymi ogniwami paliwowymi mogły osiągnąć pełen potencjał, ich infrastruktura tankowania oraz systemy i komponenty muszą spełniać najwyższe standardy jakości, zapewniając długoterminową trwałość i niezawodność. Aby to osiągnąć, kluczowe jest uwzględnienie specyficznych wymagań układów wodorowych, w tym przewodów rurowych i złączek wykorzystywanych do ich budowy. W poniższym artykule przeanalizujemy, dlaczego zapewnienie bezpiecznej i niezawodnej ochrony podczas pracy z wodorem stanowi wyzwanie dla tradycyjnych technologii instalacyjnych. Ponadto, szczegółowo omówimy kluczowe elementy konstrukcyjne, które decydują o tym, czy dana złączka jest odpowiednia do zastosowań wodorowych.

# Wyjątkowy charakter wodoru



Rozmiar pojedynczego atomu wodoru w porównaniu do piłki golfowej jest taki sam jak rozmiar piłki golfowej w porównaniu do Ziemi

Wodór to jedna z najmniejszych cząsteczek występujących w przyrodzie, co sprawia, że jego skuteczne zatrzymanie w układzie paliwowym stanowi duże wyzwanie. Ze względu na swój mikroskopijny rozmiar cząsteczki wodoru mogą przenikać nawet przez najmniejsze nieszczelności w złączkach zaciskowych. Zachowanie pełnej szczelności systemu jest kluczowe, zwłaszcza biorąc pod uwagę wysokie ciśnienie, pod jakim wodór musi być transportowany i przechowywany, aby zapewnić maksymalne korzyści wynikające z tej technologii.

- **Szczelność ma zasadnicze znaczenie dla bezpieczeństwa.** Ulatniający się gaz w każdym układzie przepływowym stanowi nieodłączne zagrożenie dla bezpieczeństwa, zwłaszcza w zastosowaniach związanych z transportem wodoru, w których użytkownicy końcowi regularnie wchodzą w interakcje z dystrybutorami gazu (np. podczas tankowania).

- **Szczelność ma zasadnicze znaczenie dla wydajności.** Szczelny układ jest w stanie efektywnie wykorzystać cały wodór, nie wytwarzając przy tym żadnych odpadów.

Cząsteczki wodoru mogą dodatkowo ulegać adsorpcji na powierzchni stali nierdzewnej, a ich poszczególne atomy mogą się rozdzielać. Ze względu na niewielkie rozmiary atomy te mogą przenikać do austenitycznej sieci krystalicznej, zbudowanej z większych atomów żelaza, niklu, chromu i molibdenu.
Choć w przypadku stali nierdzewnej 316/316L proces ten zachodzi bardzo powoli, długotrwałe działanie wysokiego ciśnienia może prowadzić do kumulacji wodoru w strukturze materiału. Zjawisko to, znane jako kruchość wodorowa, może osłabiać elementy konstrukcyjne.
Nawet przy wysokich stężeniach wodoru stal 316/316L zachowuje swoją wytrzymałość, jednak w elementach poddawanych intensywnym obciążeniom może zwiększać ryzyko propagacji mikropęknięć zmęczeniowych. Stopy o niższej odporności mogą być jeszcze bardziej podatne na to zjawisko w dłuższej perspektywie czasowej.

# Dlaczego złączki mają takie znaczenie




Pojazdy z ogniwami paliwowymi muszą sprostać nie tylko unikalnym wyzwaniom związanym z samym wodorem, ale także trudnym warunkom eksploatacyjnym, które stawiają wysokie wymagania przed elementami układu.

- Aby osiągnąć wymaganą gęstość energii, wodór jest przechowywany w zbiornikach samochodowych pod ciśnieniem od 350 do 700 barów. Układy gazowe muszą być zaprojektowane tak, aby bezpiecznie i niezawodnie wytrzymać tak wysokie ciśnienia.

- Dodatkowo, w trakcie jazdy układ wodorowy podlega znacznym naprężeniom i wibracjom. Musi być odporny na duże prędkości, nierówne nawierzchnie oraz zmienne warunki atmosferyczne.

- Stacje tankowania muszą być łatwo dostępne i bezpieczne w obsłudze dla przeciętnego użytkownika.

Z tych wszystkich powodów kluczowe jest, aby układy wodorowe – zarówno w pojazdach, jak i w infrastrukturze tankowania – były projektowane i budowane zgodnie z najwyższymi standardami jakości. Szczególnie istotną rolę odgrywają złączki zaciskowe, które odpowiadają za trwałość i szczelność połączeń w systemie. Muszą one zapewniać niezawodne działanie przez lata, a nawet dekady.

Poniżej przedstawiamy kluczowe cechy złączki, która spełnia wymagania wodorowych systemów paliwowych.

# Najważniejsze cechy

## Szczelność gazowa

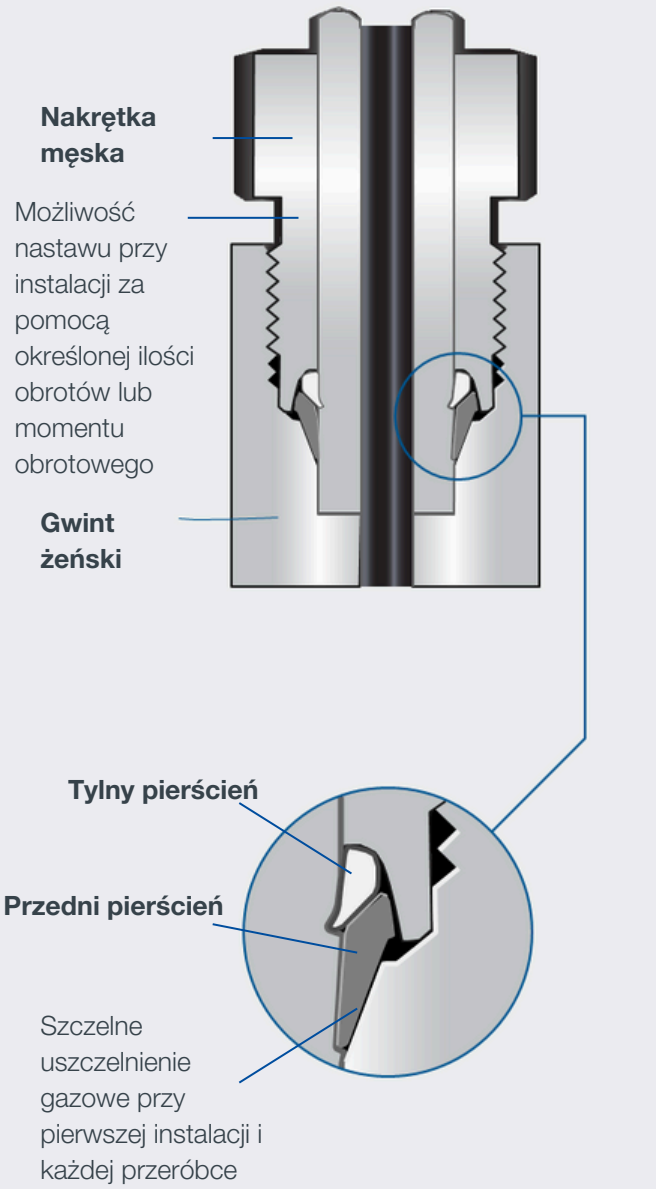
Utrzymanie szczelności w każdym punkcie połączenia instalacji wodorowej ma kluczowe znaczenie dla jej bezpieczeństwa, niezawodności i wydajności. Ze względu na niewielkie rozmiary cząsteczek wodoru zapewnienie skutecznej szczelności przy użyciu tradycyjnych technologii montażu stanowi istotne wyzwanie.

Tradycyjne złącza typu cone & thread (ze stożkiem i gwintem) uszczelniają się wzdłuż pojedynczej linii styku na stosunkowo wąskiej powierzchni. Choć takie rozwiązanie sprawdza się w wielu zastosowaniach przemysłowych i jest wystarczające dla mediów płynnych oraz wielkocząsteczkowych, w przypadku wodoru może okazać się niewystarczające. Z upływem czasu drobne cząsteczki mogą osłabić uszczelnienie, prowadząc do nieszczelności systemu.

Aby skutecznie zabezpieczyć instalację wodorową, idealna konstrukcja złączek powinna obejmować dwie linie styku, rozmieszczone na wydłużonych powierzchniach uszczelniających – jedną wzdłuż rury, drugą wzdłuż korpusu złączki. Obie powierzchnie powinny być lekko nachylone, co pozwala na optymalne rozłożenie naprężeń i zapewnia długotrwałą szczelność.

Złączka zaprojektowana dla rozwiązań wodorowych może osiągnąć taki poziom uszczelnienia dzięki dwóm pierścieniom zaciskowym- przednim, który tworzy długą płaszczyznę styku i tylnym, który skutecznie zaciska się na rurze i tworzy własne uszczelnienie powierzchniowe. Długie, precyzyjnie obrobione powierzchnie przedniego pierścienia dodatkowo zwiększają szczelność gazową, co czyni to rozwiązanie niezawodnym nawet w wymagających warunkach eksploatacyjnych.

Ten przekrój pokazuje optymalny poziom uszczelnienia, który można osiągnąć dzięki technologii montażu z dwoma pierścieniami.




Dwupierścieniowe złączki zaciskowe Swagelok® serii FK

# Najważniejsze cechy

## Siła zacisku

W instalacjach wodorowych siła zacisku złączki – czyli stała siła, z jaką złączka chwyta rurę – jest kluczowym czynnikiem wpływającym na jej wydajność i trwałość. Elementy układu muszą wytrzymywać ekstremalne warunki, w tym wysokie ciśnienia towarzyszące produkcji, transportowi, przechowywaniu i tankowaniu wodoru, a także silne wibracje generowane podczas ruchu pojazdu.

Tradycyjne złącza typu cone & thread (ze stożkiem i gwintem), w tym złączki NPT (National Pipe Thread) oraz uszczelki O-ring, zapewniają odpowiednią siłę zacisku w wielu zastosowaniach przemysłowych. Jednak w warunkach transportowych ich skuteczność może być ograniczona – ciągłe wstrząsy i drgania mogą osłabić gwinty, prowadząc do utraty szczelności. Dodatkowo, połączenia stożkowe i gwintowane są podatne na zjawisko galwanizacji, w którym dwa metale zgrzewają się ze sobą na zimno, co może utrudniać demontaż, konserwację i wymianę elementów.

Nowoczesne złączki z dwoma niskotemperaturowymi, hartowanymi pierścieniami, które wykorzystują zarówno mechanizm zawiasowy, jak i zaciskowy, stanowią znacznie bardziej niezawodne rozwiązanie. W tej konstrukcji hartowany przedni pierścień fizycznie osadza się w rurze, co pozwala osiągnąć ciśnienie znamionowe do 1050 barów (15 229 psi). To sprawia, że złączki tego typu są idealnym wyborem dla systemów wysokociśnieniowego magazynowania wodoru – zarówno w pojazdach, jak i w infrastrukturze tankowania.

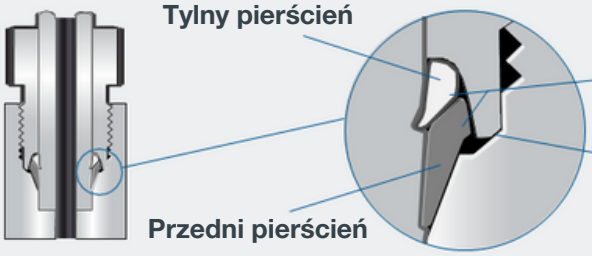
## Odporność na wibracje

Połączenia zaciskowe w pojazdach oraz infrastrukturze tankowania wodoru są narażone na intensywne i regularne wibracje, znacznie częstsze niż w przypadku typowych, stacjonarnych układów przepływowych. Dlatego złączki stosowane w tych systemach muszą charakteryzować się wyjątkową odpornością na długotrwałe obciążenia dynamiczne.

Dwupierścieniowy zacisk mechaniczny pozwala na minimalny ruch złączki przy jednoczesnym zachowaniu stałej siły zacisku. Ten efekt, zwany "ruchem sprężynowym", zapewnia doskonałą odporność na wibracje, co jest kluczowe zarówno dla układów w pojazdach, jak i dla infrastruktury tankowania wodoru, gdzie sprężanie gazu oraz dynamiczne warunki eksploatacyjne generują znaczne drgania.

Dodatkowo, omawiany powyżej ruch sprężynowy zwiększa odporność złączek na zmiany temperatury, które mogą prowadzić do rozszerzalności i kurczenia się stopów metali, wpływając tym samym na ich wydajność. Wodór może być przechowywany i transportowany w temperaturach od -40°C do 85°C, co wymaga od zastosowanych komponentów wyjątkowej trwałości i elastyczności.

Technologia z dwoma pierścieniami zapewnia wyjątkową siłę zacisku i odporność na wibracje




Solidny zacisk na rurze i zwiększona ochrona przed wibracjami

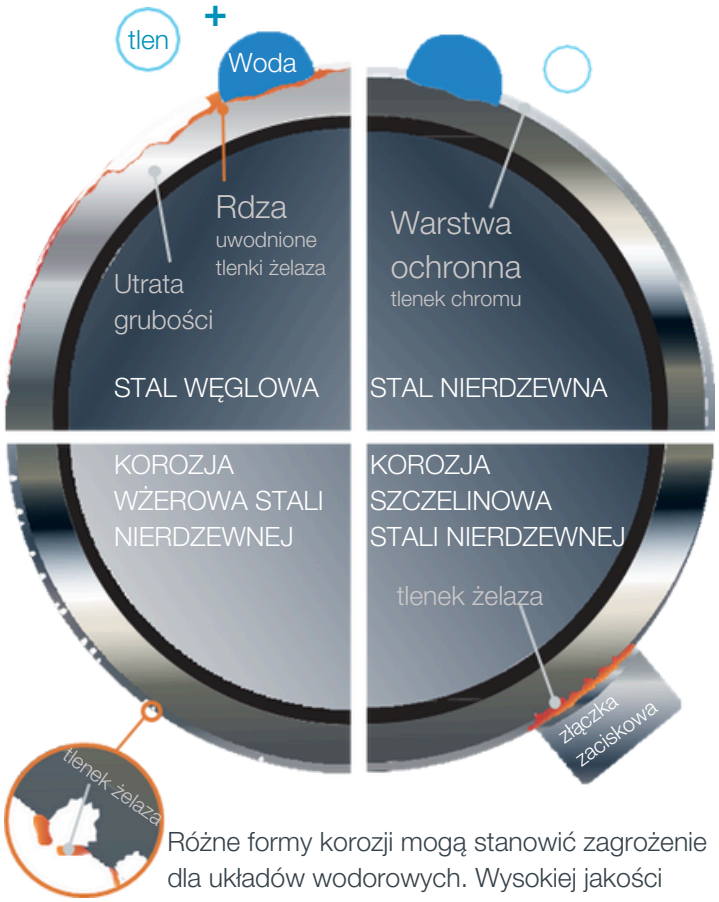
Dynamiczny klin umożliwia ponowny montaż przy użyciu momentu obrotowego

# Najważniejsze cechy

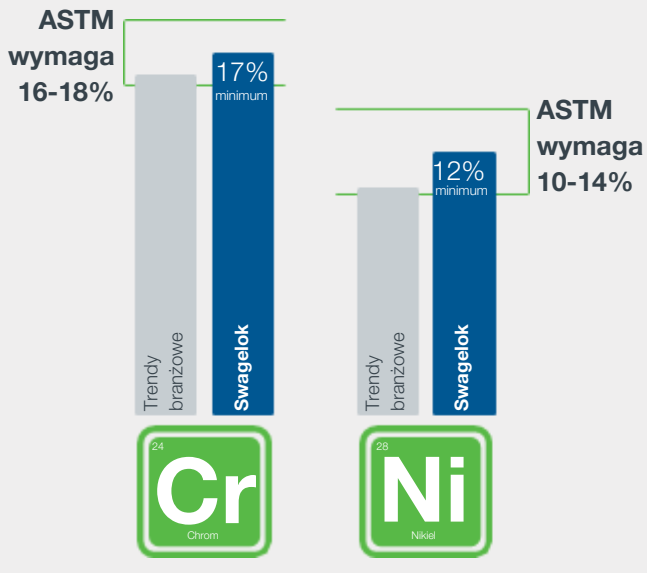
## Integralność materiału

Kontrola korozji jest kluczowym elementem zapewniającym niezawodność dwupierścieniowych złączek zaciskowych. Korozja zachodzi, gdy atomy metalu utleniają się pod wpływem kontaktu z płynem, co prowadzi do stopniowej utraty materiału na powierzchni. Proces ten zmniejsza grubość ścianki komponentu, przez co staje się on bardziej podatny na uszkodzenia mechaniczne. W aplikacjach związanych z transportem wodoru – zarówno w pojazdach, jak i w infrastrukturze do tankowania – regularne narażenie na niekorzystne warunki pogodowe sprawia, że szczególnie istotne jest, aby materiały konstrukcyjne były odporne na korozję przez cały okres eksploatacji systemu.

Jak wspomniano wcześniej, kruchość wodorowa może osłabić stal nierdzewną o niższych parametrach, która jest powszechnie stosowana w złączkach, zaworach i rurach w pojazdach wodorowych oraz infrastrukturze tankowania.




Różne formy korozji mogą stanowić zagrożenie dla układów wodorowych. Wysokiej jakości stopy mogą pomóc w zapobieganiu korozji pojazdów i infrastruktury.




Stal nierdzewna 316 Swagelok® wykracza poza minimalne specyfikacje ASTM

Podwyższona zawartość chromu i niklu w komponentach układów przepływowych zwiększa ich odporność na korozję oraz kruchość wodorową, jednocześnie zachowując większą plastyczność krytycznych elementów. Amerykańskie Stowarzyszenie Badań i Materiałów (ASTM) określa, że stal nierdzewna 316 powinna zawierać co najmniej 10% niklu. Badania wykazują jednak, że stal nierdzewna 316 o wyższej jakości, zawierająca co najmniej 12% niklu, lepiej radzi sobie z unikalnymi wyzwaniami związanymi z wodorem.

# Najważniejsze cechy

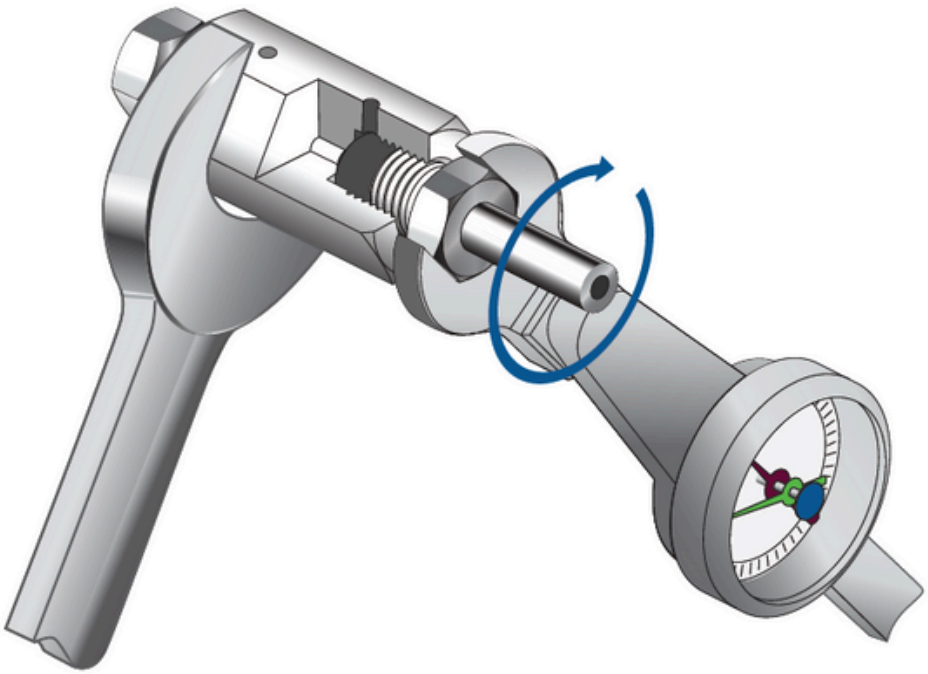
## Łatwość instalacji

Wraz ze wzrostem popytu na transport oparty na wodorze oraz przyspieszeniem budowy infrastruktury do tankowania przez producentów OEM w celu wsparcia tego trendu, projektanci powinni zwrócić uwagę na złączki, które zapewniają prosty, szybki, łatwy do powtórzenia i wysokiej jakości proces instalacji od pierwszego montażu.

Przykładowo, tradycyjne złącza typu cone & thread (ze stożkiem i gwintem) wymagają specjalistycznych narzędzi, materiałów oraz olejów smarujących, które zmniejszają tarcie podczas procesu stożkowania i gwintowania. Ponadto rura musi być odpowiednio stożkowana i gwintowana przy użyciu specjalistycznych narzędzi przed połączeniem ze złączką. Ważne jest, aby podczas tego procesu nie powstały żadne zadziory, wyżłobienia ani zadrapania. Po odpowiednim przygotowaniu rury nakręca się na nią specjalny pierścień, a następnie dokręca nakrętką w celu doszczelnienia. Nawet w przypadku wykwalifikowanych instalatorów oznaczać to będzie wydłużony czas i większą złożoność tego procesu.

Złączki dwupierścieniowe zaciskowe pozwalają instalatorom zakończyć montaż około pięć razy szybciej niż w przypadku porównywalnych złączek stożkowych i gwintowanych, zapewniając szczelny zacisk już przy pierwszym montażu. Eliminują one konieczność przeróbek po wstępnym montażu, jednocześnie znacznie obniżając całkowite koszty konserwacji.

Złączki z zaciskiem mechanicznym charakteryzują się prostszym procesem instalacji, z mniejszym ryzykiem błędów popełnianych przez instalatorów, co prowadzi do bardziej spójnego i niezawodnego działania przez cały okres eksploatacji sprzętu. Dodatkowo, ich montaż nie wymaga specjalistycznych narzędzi; wystarczy prosty klucz, a instalacja polega jedynie na doborze odpowiedniego momentu obrotowego lub liczby obrotów.



# Rozwiązanie zaprojektowane dla wodoru

## Złączki Swagelok® serii FK

W przypadku zastosowań związanych z wodorem, kluczowe znaczenie mają szczelność, siła zacisku, odporność na wibracje, integralność materiału i łatwość montażu. Dwupierścieniowe złączki zaciskowe Swagelok serii FK spełniają wszystkie te wymagania, oferując rozwiązanie zaprojektowane specjalnie do instalacji wodorowych.

Złączki serii FK są kompatybilne z różnorodnymi typami i materiałami rur oraz wyposażone w hartowane w niskich temperaturach pierścienie, które zapewniają szczelność, niezawodny zacisk i odporność na wibracje.

Złączki serii FK posiadają bogatą certyfikację materiałową, w tym do zastosowań wodorowych.

Są produkowane z wysokiej jakości stali nierdzewnej 316/316L, o minimalnej zawartości niklu 12%, która jest odporna na korozję i kruchość wodorową.

Prosta, opatentowana konstrukcja składa się z żeńskiego gwintu na korpusie złączki oraz wstępnie zmontowanego kartridża, zawierającego męską nakrętkę i oznaczone kolorami przedni i tylny pierścień, zamocowane na jednorazowym plastikowym trzpieniu. Wstępnie zmontowany kartridż zapewnia instalatorom prawidłową orientację tulei oraz wizualne potwierdzenie jej montażu i odpowiedniego osadzenia w gwincie żeńskim. Elementy są zwalniane dopiero po ręcznym dokręceniu nakrętki na korpusie złączki. Taki uproszczony proces pozwala na instalację złączek serii FK do pięciu razy szybciej niż tradycyjnych złączek stożkowych i gwintowanych, bez konieczności używania specjalistycznego oprzyrządowania.

Dwupierścieniowe złączki zaciskowe serii FK są wspierane przez nasz kompleksowy pakiet usług, w tym specjalistyczne szkolenia, ocenę montażu w miejscu zastosowania, usługi projektowe i instalacyjne oraz wiele innych.

Długoterminowa rentowność transportu wodorowego będzie zależna od bezpieczeństwa, niezawodności i trwałości pojazdów oraz infrastruktury wodorowej. Wybór odpowiednich komponentów do krytycznych systemów może pomóc w osiągnięciu tych celów. Od momentu wprowadzenia na rynek, złączki serii FK znalazły szerokie zastosowanie w różnych branżach i aplikacjach. Pozostają one optymalnym wyborem zarówno dla obecnych, jak i przyszłych systemów transportu oraz infrastruktury wodorowej.

Chcesz dowiedzieć się więcej? Skontaktuj się z lokalnym autoryzowanym centrum sprzedaży i serwisu Swagelok Polska: **info@centralfluid.pl** już dziś, aby porozmawiać na temat złączek z serii FK oraz pełnego serwisu i wsparcia, które oferujemy branży mobilności wodorowej.



Dwupierścieniowe złączki zaciskowe serii FK są dostępne dla potrzeb wodorowych układów paliwowych.

Źródła:
1. Departament Energii Stanów Zjednoczonych, Biuro Efektywności Energetycznej i Energii Odnawialnej: https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml

2. Departament Energii Stanów Zjednoczonych, Centrum Danych Paliw Alternatywnych: https://afdc.energy.gov/vehicles/fuel_cell.html#:~:text=FCEVs are fueled with pure,driving range over 300 miles.

3. Hydrogen Compatibility Handbook for Stainless Steels Savannah River Laboratory, 1983, s. 15, 18, 19 oraz Technical Reference of Hydrogen Compatibility of Materials Austenitic Stainless Steels Type 316, Sandia National Laboratories, 2005, s. 1

Wszystkie przedstawione znaki usługowe i towarowe są własnością i są zarejestrowane przez Swagelok Company, chyba że zaznaczono inaczej. © 2021 Swagelok Company.



**Swagelok Polska**
Central Fluidsystems Sp.z o.o.
ul. Graniczna 186/9, 54-516 Wrocław
NIP: PL5252580502, REGON: 147125762
**info@centralfluid.pl tel: +48 717 079 150**