

Stanisław Jamroz

Zakłady Automatyki POLNA SA, Przemysł

Krzysztof Mróz

KRNIgZ Dębno (PGNiG SA w Warszawie, Oddział w Zielonej Górze)

Elementy ceramiczne w zaworach regulacyjnych

Wprowadzenie

W zaworach regulacyjnych występuje szereg zjawisk, które działają destrukcyjnie na elementy wewnętrzne zaworu, doprowadzając do ich przedwczesnego zużycia, a nawet awaryjnego uszkodzenia. Zakłóca to proces technologiczny i niejednokrotnie jest przyczyną dużych strat. Przyczynami tych zjawisk są najczęściej: kawitacja, *flashing* i erozja.

Kawitacja polega na miejscowym odparowaniu cieczy w wyniku spadku ciśnienia poniżej wartości ciśnienia parowania p_v . Występuje najczęściej w strefie *vena contracta*, miejscu największej prędkości przepływu i największego spadku ciśnienia. W cieczy tworzą się pęcherze pary, która wraz ze wzrostem ciśnienia na wypływie zaworu ulega implozji. Zjawisko to charakteryzuje się nagłymi przyśpieszeniami i uderzeniami mieszaniny dwufazowej: ciecz–para. Wyzwalająca się energia wywołuje naciski powierzchniowe, niejednokrotnie rzędu 700 MPa, co prowadzi do uszkodzenia elementów wewnętrznych zaworu. Ponadto kawitacja powoduje drgania i wibracje, wzrost poziomu hałasu i zmniejszenie współczynnika przepływu zaworu.

Zjawisko *flashingu* polega na stopniowym odparowywaniu cieczy w wyniku spadku ciśnienia za zaworem poniżej wartości ciśnienia parowania p_v .

W cieczy tworzy się mieszanina dwufazowa cieczy i pary, rośnie objętość i prędkość przepływu. Nieodparowane cząstki cieczy uderzają z dużą energią o powierzchnie elementów wewnętrznych zaworu, powodując ich zużycie w wyniku erozji.

Problem erozji i zużycia ściernego jest jeszcze bardziej intensywny w przypadkach, gdy medium zawiera cząstki

stałe. Jeżeli dodatkowo w zaworze występują duże ciśnienia i prędkości przepływu, to trwałość standardowych elementów zaworu można szacować w godzinach.

Metody zapobiegania opisanym niekorzystnym zjawiskom można podzielić na trzy grupy:

- konstrukcja zaworu,
- instalacja zaworu,
- materiały konstrukcyjne.

Czołowi producenci armatury od szeregu lat rozwijają konstrukcje zaworów przystosowanych do pracy w trudnych warunkach. Zawory z wielootworowymi strukturami dławiącymi jak grzyby, klatki, płyty, z elementami wielostopniowymi, ograniczają lub eliminują problemy związane z hałasem, kawitacją, *flashingiem* czy przepływem dławionym. Wymienione rozwiązania sprawdziły się i znalazły uznanie odbiorców.

Ważną rolę odgrywa instalacja zaworu, wybór między zaworem przelotowym a kątowym, określenie korzystnego dla danej aplikacji kierunku przepływu. Problemy te w sposób bardziej szczegółowy zostaną przedstawione w dalszej części artykułu.

Bardzo duże znaczenie dla trwałości i niezawodności wyrobu ma właściwy dobór materiałów konstrukcyjnych i sposobów podwyższania ich własności.

W zastosowaniu są następujące metody poprawy własności mechanicznych elementów zaworu:

- ulepszanie cieplne w zakresie twardości 35–55 HRC, w zależności od rodzaju i funkcji części,
- stelliteowanie (stellite nr 6) faz lub powierzchni gniazd, grzybów, tulejek prowadzących, trzpieni; twardość ok. 40 HRC,

- elementy wykonywane z pełnego stellitu (grzyby, gniazda) lub z tytanu (trzcienie),
- azotowanie (CrN) kąpielowe lub gazowe, twardość 900 HV, grubość warstwy utwardzonej ok. 0,1 mm,
- powłoki nakładane na wewnętrzne powierzchnie korpusu, pasta BELZONA 1590,
- elementy wykonywane z ceramiki.

Ceramika

Ceramika jest tworzywem, które ze względu na swoje wyjątkowe własności mechaniczne i chemiczne coraz powszechniej zaczyna być stosowane w nowoczesnych konstrukcjach maszyn i urządzeń, w tym w zaworach regulacyjnych. Najczęściej stosowane są materiały ceramiczne na bazie tlenku glinu (Al_2O_3), azotku krzemu (Si_3N_4) oraz tlenku cyrkonu (ZrO_2), którego właściwości zostaną przedstawione bardziej szczegółowo. Ceramika ZrO_2 formowana jest z granulatu tlenku cyrkonu metodą spiekania w temperaturze 1500–2200°C. Uzyskany w ten sposób półfabrykat wymaga obróbki wykańczającej za pomocą szlifowania ścierniwem diamentowym.

Ceramika ZrO_2 charakteryzuje się następującymi właściwościami mechanicznymi:

- twardość: 1200 HV, 70 HRC,
- maksymalna temperatura pracy: 500°C,
- minimalna wytrzymałość na ściskanie: 2100 MPa,
- minimalna wytrzymałość na zginanie: 300 MPa,
- moduł Younga: 210 GPa,

- właściwości tribologiczne: samosmarowość,
- wysoka odporność na ścieranie,
- niska przewodność cieplna.

Ceramikę ZrO_2 cechuje doskonała odporność chemiczna na większość stosowanych w przepływach mediów, z wyjątkiem roztworów kwasu siarkowego i fluorowego.

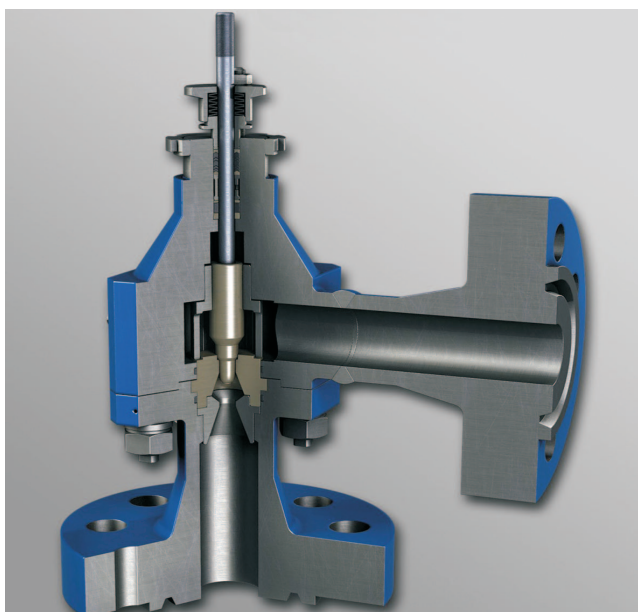
Specyficzne właściwości ceramiki powodują, że części rzadko wykonywane są tylko z tego materiału. Najczęściej są to kompozyty metalowo-ceramiczne. Łączenie obu składników odbywa się za pomocą klejenia lub połączeń mechanicznych.

W celu wyboru właściwego materiału oraz poprawnego zastosowania elementów z ceramiki niezbędne są informacje na temat parametrów pracy: temperatury, środowiska chemicznego, obciążenia z uwzględnieniem oddziaływań dynamicznych.

Zastosowanie ceramiki dzięki jej własnościom mechanicznym i chemicznym powoduje przeciętnie 8–10-krotne zwiększenie trwałości i czasu użytkowania części w porównaniu z elementami wykonanymi tradycyjną technologią.

Konstrukcja

Poniżej przedstawiono kilka rozwiązań konstrukcyjnych zaworów z wykorzystaniem elementów z ceramiki.



Rys. 1. Zawór kątowy do mediów ściśliwych

Konstrukcja z rysunku 1 rozwiązuje problem regulacji przepływu gazu o spadku ciśnienia do 400 bar. Elementy ceramiczne stanowią: grzyb, gniazdo i tuleja dławiąca (kryza). Zastosowanie tulei pozwala na ograniczenie prędkości przepływu i ponad dwukrotne obniżenie poziomu hałasu. Kierunek przepływu – nad grzyb (FTC) powoduje, że struga gazu kierowana jest do prostego odcinka rurociągu, co obniża erozyjne działanie medium, szczególnie przy spodziewanej zawartości w nim cząstek stałych.

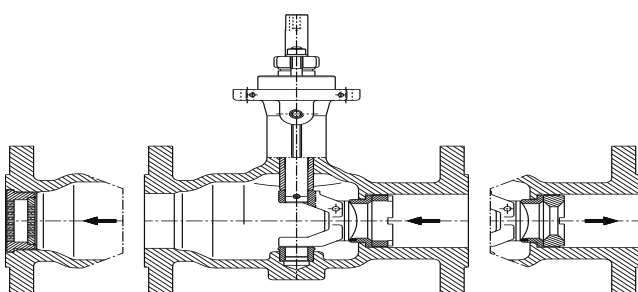
Zawór przedstawiony na rysunku 2 ma konstrukcję antykawitacyjną. Elementy ceramiczne w tym przypadku to grzyb i gniazdo. Odpowiednio ukształtowane powodują wielostopniowy spadek ciśnienia na zaworze, w celu ograniczenia zagrożenia kawitacją. Kierunek przepływu – pod grzyb (FTO). Tuleja wewnątrz komory wypływu wykonana jest z pełnego stellitu, dla ochrony przed erozją powierzchni korpusu.

Korpusy zaworów kątowych z rysunków 1 i 2 są dzielone, co umożliwia łatwy dostęp do elementów wewnętrznych

w celu przeglądu i serwisu. Istotne jest rozwiązanie elementów wewnętrznych zaworu. Konstrukcja korpusu kątowna lub przelotowa, średnice, ciśnienia, formy przyłączy przystosowane będą do potrzeb klienta.



Rys. 2. Zawór kątowy do ciecży



Rys. 3. Zawór z grzybem obrotowym

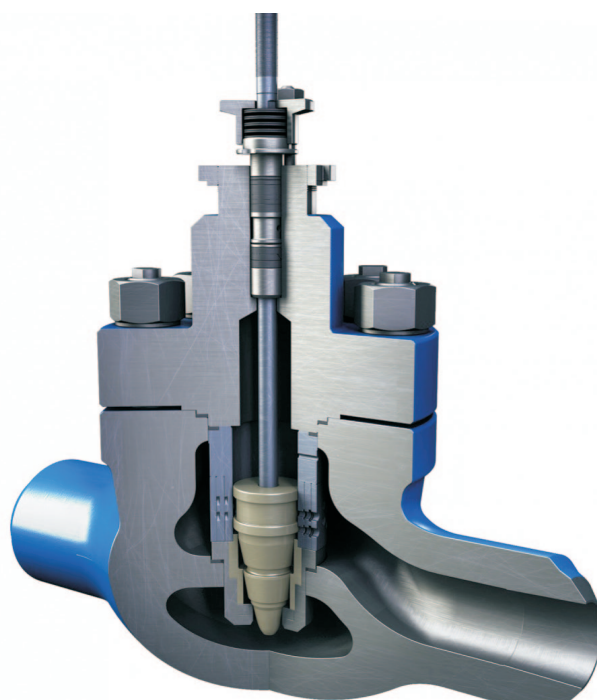
Elementy ceramiczne w zaworach z rysunku 3 stanowią grzyby i gniazdo, a stosowane są głównie w przypadku

Poniżej przedstawiono doświadczenia z eksploatacji zaprojektowanych i wykonanych w Polsce zaworów z elementami ceramicznymi oraz korzyści wynikające z tych aplikacji w gazownictwie. Mając na uwadze powyższe problemy jak i zwiększone wymagania, użytkownik zdecydował się na zastosowanie ceramiki na grzyby i gniazda zaworu.

Zawór z rysunku 1, oznaczony symbolem Z1A-C2, przeznaczony został dla Ośrodka Produkcyjnego Winna Góra (PGNiG

spodziewanej erozji zawieradła. Przy przepływie gazu korzystniejszy jest przepływ nad grzyb (FTC). Możliwe jest zastosowanie tulei dławiącej (kryzy) na wypływie w celu obniżenia prędkości przepływu i poziomu hałasu. Zawory z grzybem obrotowym charakteryzują się małym współczynnikiem odzysku ciśnienia F_L , stąd niskie wartości krytycznych spadków ciśnienia $\Delta p_{kr} = F_L^2(p_1 - p_v)$, przy których pojawia się kavitacja. Zastosowanie elementów dławiących na wypływie przy kierunku przepływu pod grzyb (FTO) znacznie poprawia odporność zaworu na kavitację.

Zawór z rysunku 4 stosowany jest do ciecży przy spadku ciśnienia rzędu 200 bar. Elementy ceramiczne stanowią wielostopniowy grzyb i gniazdo. Dodatkowa redukcja ciśnienia następuje w zespole trzech klatek dławiących z promieniowym rozmieszczeniem otworów przepływowych. Zawór może być stosowany w układach obejściowych (*by-pass*) pomp zasilających kotły energetyczne.



Rys. 4. Zawór przelotowy antykawitacyjny

Zastosowanie

SA w Warszawie, Oddział w Zielonej Górze). Pracuje w układzie separacji i redukcji ciśnienia, w którym to gaz ($\text{CH}_4 - 79,9\%$; $\text{N}_2 - 18,9\%$; $\text{CO}_2 - 0,8\%$; $\text{He} - 0,1\%$; $\text{C}_2\text{H}_4 - 0,3\%$) z odwiertu Winna Góra-1 jest przesyłany pod pełnym ciśnieniem głowicowym (25 MPa) z wydajnością 50 Nm^3/min do separatora I stopnia. W separatorze tym zostaje odseparowana woda złożowa. Następnie gaz ziemny kierowany jest do podgrzewacza liniowego w celu podgrzania go przed redukcją. Wychodzący stru-

mień gazu o ciśnieniu $p_1 = 24,83$ MPa i temperaturze $T_1 = +30^\circ\text{C}$ poddawany jest redukcji ciśnienia na zaworze Z1A-C2 do wartości $p_2 = 6,3$ MPa, w wyniku czego schładza się do temperatury $T_2 = -5^\circ\text{C}$ i następuje dalsze wydzielenie wody złożowej ze strumienia gazu w separatorze II stopnia oraz jego osuszenie.

Zawory z rysunków 2 i 3 zostały zainstalowane w KRNiGZ Dębno (PGNiG SA w Warszawie, Oddział w Zielonej Górze). Pracują one w najtrudniejszych warunkach, jakie występują w kopalni przy eksploatacji płynu złożowego będącego mieszaniną ropy naftowej, towarzyszącego jej gazu oraz wody złożowej. Często domieszką do wyżej przedstawionego składu są cząstki stałe stanowiące elementy skały macierzystej, jak i pozostałości płuczki wiertniczej i cieczy zabiegowych.

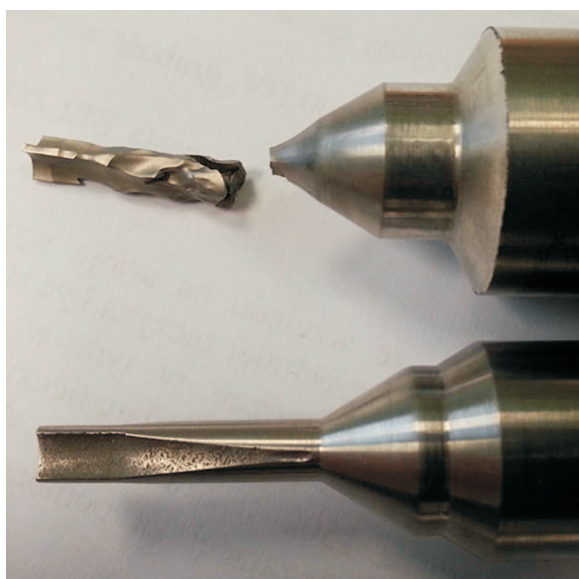
Ropa naftowa to ciecz o gęstości 800 kg/m^3 , lepkości 4 cST , temperaturze płynięcia -36°C i zawartości ciał stałych $0,2\%$ obj. oraz parafiny 5% wag.

Główne składniki gazu to: azot – 51% , metan – 38% , etan – 4% , propan – 2% , H_2S – 4% i CO_2 – $0,5\%$, C_{4+} – $0,5\%$.

Woda złożowa to w wielu przypadkach (w zależności od odwiertu) w 100% nasycona solanka o gęstości do 1250 kg/m^3 , pH $5,5$, zawartości Cl^- 200 g/l .

Płyn złożowy wypływa z odwiertu eksploatacyjnego pod ciśnieniem od 250 do 430 bar(g) i temperaturze od 30°C do 60°C , w zależności od wydajności złoża ropy, ilości towarzyszącego jej gazu i wody złożowej, jak również od stanu technicznego samego odwiertu. Na instalacji przyodwiertowej zostaje on podgrzany do 65°C i podany redukcji ciśnienia do około 70 bar(g) (Δp do 360 bar). Za redukcją ciśnienia z jednoczesną kontrolą przepływu odpowiadają kątowe zawory renomowanych firm zachod-

nych wykonane w klasie $10\ 000$ według API 6A zgodnie z normą NACE MR 0175. Zawory te są częścią systemu bezpieczeństwa instalacji i pełnią dodatkowo funkcję zaworu szybkiego zamykania. Problemy z eksploatacją tego typu zaworów polegały na szybkim zużywaniu się elementów wewnętrznych, w wyniku czego nie mogły one spełniać swojej podstawowej roli jako zawory szybkiego odcięcia. Dochodziło również do rozszczelnienia korpusu zaworu, co z uwagi na obecność siarkowodoru stanowiło niebezpieczeństwo dla ludzi i środowiska. Zużycie wewnętrznych elementów było wynikiem działania praktycznie wszystkich możliwych niekorzystnych zjawisk, jakie występują w zaworach. Ze względu na zanieczyszczenia stałe, parafinę i kryształki soli, które w skuteczny sposób zaklejają struktury dławiące o małych przekrojach, zastosowanie klasycznych wykonań antykawitacyjnych przyniosło by przeciwny skutek, gdyż doprowadziłoby w krótkim okresie do zablokowania przepływu przez zawór. Skuteczną metodą mogącą sprostać postawionym przed zaworem wymaganiom było zastosowanie w nim ceramiki – materiału całkowicie odpornego na zużycie mechaniczne grzyba i gniazda, jak również szerokich kanałów przepływowych odpornych na zanieczyszczenia. Istotną zaletą tego rozwiązania jest minimalna liczba elementów wewnętrznych, co czyni zawór niezwykle prostym w obsłudze i naprawie. Decydując się na ceramikę, braliśmy pod uwagę również jej walory chemiczne. Wysokie ciśnienie parcjalne H_2S (powyżej 1000 kPa) w gazie zgodnie z normą ISO 15156 nie pozwala na użycie stali ulepszonych cieplnie, a stelliteowanie nie sprawdziło się w dotychczasowych wykonaniach zaworów (patrz rysunek 5).



Rys. 5. Metalowe elementy wewnętrzne eksploatowanych zaworów

Zastosowanie przepływu w kierunku FTO, wymuszone przez istniejącą instalację, posiada zalety związane z możliwością płynnej regulacji przy niewielkim otwarciu zaworu (brak zjawiska odrywania grzyba od gniazda przy otwieraniu i uderzania grzyba o gniazdo przy zamknięciu). Dodatkowo w zaworach o przepływie FTO uszczelnienie trzpienia występuje po stronie niskiego ciśnienia (w zaworze zastosowano bezobsługowe uszczelnienie TA-Luft PTFE).

Od 4 grudnia 2012 roku zawór oznaczony symbolem Z1A-C1 jest testowany na odwiercie Barnówko-13, pracującym przy następujących parametrach:

- $p_1 = 259 \text{ bar(g)}$,
- $T_1 = 39^\circ\text{C}$,
- $p_2 = 71 \text{ bar(g)}$,
- $Q_{\text{ropa}} = 50 \text{ ton/dobę}$,
- $Q_{\text{gaz}} = 17\,500 \text{ Nm}^3/\text{dobę}$,
- $Q_{\text{solanka}} = 400 \text{ l/dobę}$.

Po miesiącu ciągłej eksploatacji przeprowadzono, z wynikiem pozytywnym, połowe testy szczelności, co jest optymistyczną prognozą przyszłości tych rozwiązań.

Zaworami, w przypadku których występują w kopalni duże problemy, są zawory z grzybem obrotowym. Zawór 1-calowy CL600 odpowiada za odpuszczanie wody złożowej z separatorów testowych w Ośrodku Centralnym

Barnówko. Separator grawitacyjny poziomy, pracujący przy ciśnieniu 66 bar(g) i temperaturze do 60°C, rozdziela płyn złożowy na trzy frakcje: gaz, ropę i wodę złożową. Woda złożowa z separatora jest odpuszczana do innego zbiornika, pracującego pod ciśnieniem 3 bar(g) ($\Delta p = 63 \text{ bar}$), w celu jej uzdatnienia. Ze względu na niewielką ilość wody na większości separatorów testowych odpuszczanie odbywa się w sposób okresowy. Aby zapobiec przedostaniu się ropy do układu uzdatniania wody złożowej, zawór odpuszczający musi wykazywać się 100-proc. szczelnością zamknięcia.

Mimo zastosowania pełnego stellitu na elementy gniazda, jak i grzyba, a w późniejszym okresie stali 1.4125 ulepszonej cieplnie do 55 HRC, nie udało się wydłużyć trwałości elementów wewnętrznych zaworu powyżej trzech miesięcy.

Mając na uwadze powyższe problemy oraz zwiększone wymagania, użytkownik zdecydował się na zastosowanie ceramiki na grzyby i gniazda zaworu. Zastosowanie ceramiki, ze względu na jej specyficzne własności mechaniczne, wymagało wprowadzenia pewnych zmian konstrukcyjnych w skojarzeniu grzyb–gniazdo, w miejscu mocowania grzyba, jak i w uszczelnieniu grzyba z gniazdem. Próby techniczne i badania eksploatacyjne powyższego rozwiązania rozpoczęły się w 2013 roku.

Wnioski

Przedstawione argumenty techniczne oraz doświadczenia eksploatacyjne wykazują, że zawory regulacyjne z ceramicznymi elementami wewnętrznymi stanowią korzystną i zasługującą na rozpowszechnienie tendencję w rozwoju tej grupy wyrobów.

Do wykorzystania wszystkich zalet ceramiki niezbędne jest precyzyjne określenie warunków stosowania: rodzaju i właściwości medium, temperatury,

ciśnienia i przepływu w kilku punktach pracy. W oparciu o profesjonalne programy obliczeniowe konstruktor diagnozuje zjawiska występujące w zaworze oraz ustala najwłaściwszą dla danej aplikacji konstrukcję zaworu, wykorzystując swoje doświadczenie zawodowe i informacje z rynku z dotychczasowych zastosowań w celu maksymalnego spełnienia indywidualnych wymagań klienta.



Stanisław JAMROZ – absolwent Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Przez wiele lat Główny Konstruktor w Zakładach Automatyki „POLNA” SA w Przemyślu. Autor szeregu opracowań konstrukcyjnych z zakresu automatyki przemysłowej, zastosowanych z sukcesem w różnych gałęziach gospodarki. Współautor kilkunastu polskich patentów i wzorów użytkowych.



Krzysztof MRÓZ – ur. 1977 r. Absolwent Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Wydział Wiertnictwa Nafty i Gazu, specjalność Gazownictwo Ziemi. Od 2002 r. zatrudniony w PGNiG SA w Warszawie, Oddział w Zielonej Górze. Obecnie Zastępca Kierownika Kopalni ds. Utrzymania Ruchu na KRNiGZ Dębno.