

WODÓR – ZIEŁONE ZŁOTO

INFRASTRUKTURA PRZESYŁOWA I WPŁYW WODORU NA MATERIAŁY KONSTRUKCYJNE



SEBASTIAN KOZIKOWSKI

Ekspert Urzędów Ciśnieniowych
Urząd Dozoru Technicznego
Oddział w Gdańsku



KRZYSZTOF SZYMLEK

Ekspert Urzędów Ciśnieniowych
Urząd Dozoru Technicznego
Oddział w Gdańsku

Od wielu miesięcy, na łamach naszego biuletynu „Inspektor – Technika i Bezpieczeństwo”, przedstawiamy Państwu szerokie możliwości zastosowania wodoru w różnych gałęziach przemysłu. Wodór to nadzieja na intensywny, bezpieczny i zrównoważony rozwój sektora energetycznego.

Czy możliwe jest przechowywanie, transport i dystrybucja wodoru przy wykorzystaniu istniejącej infrastruktury gazowej?

W jaki sposób wodór może wpływać na zastosowane do budowy materiały, takie jak stal czy tworzywa?

Na te i wiele innych pytań znajdują Państwo szczegółowe odpowiedzi w bieżącym numerze biuletynu.

W momencie, gdy zapotrzebowanie odbiorcy na wodór staje się bardzo duże, dostarczanie gazu cysternami i butlozami przestaje być ekonomicznie opłacalne. Wykorzystywane są wówczas dedykowane rurociągi wodorowe, które zapewniają wymagane objętości gazów.

Obecnie w skali globalnej istnieje około 16 000 km rurociągów wodoru dostarczających wodór do rafinerii i zakładów chemicznych. Przykładowo między Belgią, Francją i Holandią istnieje gęsta sieć połączeń wodorowych. Liczne rurociągi wodorowe są też w miejscach przemysłowych, tj.: w Zagłębiu Ruhry w Niemczech lub wzdłuż południowo-wschodniej linii brzegowej w Stanach Zjednoczonych. W Niemczech do roku 2030 planowane jest oddanie kolejnych 1200 km sieci wodorowej [1]. Przy budowie nowych gazociągów przesyłowych i dystrybucyjnych wodoru można wykorzystać przepisy ASME B 31.12 (Hydrogen Piping and Pipelines).

Aby skutecznie ograniczyć skalę globalnego ocieplenia, należy zacząć korzystać z energii w oszczędny sposób oraz dążyć do ograniczania zużycia paliw kopalnych, w tym gazu ziemnego, i zastępowania ich odnawialnymi źródłami energii (OZE). Jednak efektywne wykorzystanie OZE wymaga opracowania uzasadnionego ekonomicznie i możliwego ze względów technicznych sposobu magazynowania uzyskanej energii.

Jednym ze sposobów magazynowania nadmiarowej energii elektrycznej rokującym duże nadzieje są technologie power-to-gas, w których powstały np. w wyniku hydrolizy wody wodór, będący nośnikiem energii, zostaje zatłoczony i zmagazynowany w sieci przesyłowej gazu ziemnego. Takie rozwiązanie wpływa jednak na zmianę właściwości powstałej w sieci gazowej mieszaniny gaz ziemny-wodór, zarówno w stosunku do właściwości gazu ziemnego, jak i wodoru. Zmienione właściwości mieszaniny gaz ziemny-wodór mogą wpływać na wiele aspektów związanych z funkcjonowaniem systemu gazowniczego, w tym na prawidłowość prowadzenia pomiarów rozliczeniowych, a także na możliwość bezpiecznego wykorzystania takiej mieszaniny przez odbiorcę końcowego [2].

Powstaje zatem pytanie: czy można obecną infrastrukturę służącą do dystrybucji i przesyłu gazu ziemnego wykorzystać do przesyłu mieszaniny gazu ziemnego i wodoru lub transportu czystego wodoru?

WŁASNOŚCI WODORU I JEGO WPŁYW NA URZĄDZENIA SYSTEMU DYSTRYBUCYJNEGO

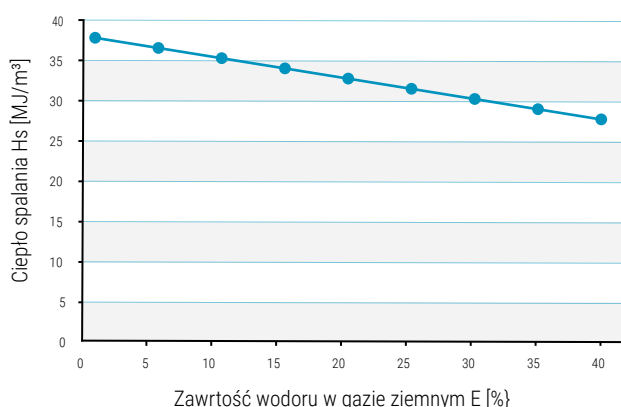
- Atom wodoru zbudowany jest z jednego protonu i jednego elektronu.
- Wodór tworzy bardzo trwałe cząsteczki dwuatomowe, które w wysokich temperaturach rozpadają się na pojedyncze atomy.

- Jest najlżejszy ze wszystkich pierwiastków i gazów (niezależnie od stanu skupienia), 14 razy lżejszy od powietrza.
- Jego gęstość wynosi 0,082 kg/m³ (gęstość gazu ziemnego to w przybliżeniu 0,75 kg/m³).
- Wodór to gaz bezbarwny, bezwonny i nietoksyczny, który nie rozpuszcza się w wodzie.
- Jest bardzo reaktywny, palny, a w połączeniu z tlenem tworzy mieszaninę wybuchową.

W przeciwieństwie do paliw węglowych, podczas spalania wodoru nie powstają szkodliwe produkty uboczne – powstaje tylko energia i czysta woda. Pierwiastek ten nie wywołuje kwaśnych deszczów, nie niszczy warstwy ozonowej ani nie tworzy szkodliwych emisji.

Wodór wykazuje dużą szybkość dyfuzji przez przegrody porowate, gumę, a nawet niektóre metale.

Wodór charakteryzuje się też najwyższą wartością opałową odniesioną do jednostki masy (119,9 MJ/kg) w stosunku do innych paliw, tj. benzyny (43,2 MJ/kg), ON (41,8 MJ/kg), gazu ziemnego (38,2-47,2 MJ/kg) czy metanu (50,0 MJ/kg). Dodanie wodoru do gazu ziemnego spowoduje natomiast zmniejszenie wartości kalorycznej gazu odniesionej do jednostki objętości. Na rysunku 1. przedstawiono zmianę (spadek) wartości ciepła spalania gazu ziemnego o wartości wyjściowej H_s = 37,9 MJ/m³ po dodaniu wodoru [3].



Rys. 1. Zależność ciepła spalania gazu ziemnego od zawartości wodoru [3]

Należy zaznaczyć, że długość płomienia palącego się wodoru jest krótsza względem płomienia metanu, co jest efektem dużo większej szybkości spalania wodoru.

Z punktu widzenia użytkowego trzeba także wspomnieć o granicach wybuchowości wodoru, które istotnie różnią się od metanu.

Dolna granica wybuchowości (DGW) wynosi 4,1%, podczas gdy dla metanu wynosi ona 4,5%.

Górna granica wybuchowości (GGW) wynosi 75%, a dla metanu 15%.

- Jak wynika z powyższego, właściwości fizykochemiczne wodoru (np. gęstość, lepkość itd.) istotnie różnią się od właściwości fizykochemicznych składników gazu ziemnego, takich jak metan, etan, propan, azot itd.
- W związku z tym właściwości mieszaniny gazowej po dodaniu do niej wodoru będą znacznie różnić się od właściwości obecnie stosowanego gazu ziemnego.

- Tym samym elementy systemu gazowniczego, takie jak rury, zawory, zasuwy, kurki, kompensatory, przejścia, reduktory, osuszacze, gazomierze, przetworniki pomiarowe, aparatura kontrolna, a także odbiorniki gazu u odbiorców końcowych będą podlegać oddziaływaniu wodoru.
- Należy zwrócić uwagę, że elementy stosowane do budowy sieci gazowych czy odbiorniki gazu u odbiorców końcowych mogą różnić się co do właściwości w poszczególnych krajach.
- Tym samym uzyskanie odpowiedzi na dany problem w jednym kraju, np. dotyczący wpływu wodoru na określone rury stalowe, nie oznacza automatycznie rozwiązania problemu w innych krajach [3].

TRWAŁOŚĆ RUROCIĄGÓW

Trwałość niektórych rur metalowych może ulec pogorszeniu, gdy są wystawione na działanie wodoru przez długi czas, szczególnie w przypadku wodoru w wysokich stężeniach i pod wysokim ciśnieniem. Ten efekt może być niepokojący w warunkach, w których wodór jest wstrzykiwany w wysokich stężeniach do istniejącego wysokociśnieniowego systemu linii gazu ziemnego. Trwałość rur metalowych w dużym stopniu zależy od rodzaju stali i musi być oceniana indywidualnie dla każdego przypadku.

Metalowe rury **w amerykańskich systemach dystrybucyjnych** (uwaga, nie przesyłowych) **są głównie wykonane ze stali o niskiej wytrzymałości, zwykle API 5L A, B, X42, X46** i generalnie nie są podatne na kruchość wywołaną wodorem w normalnych warunkach pracy. Przy ciśnieniach i poziomach naprężeń występujących w systemie dystrybucji (ciśnienie robocze jest zwykle mniejsze niż 250 psig (17,2 bar), a poziom naprężeń w większości rur stalowych, generowanych przez ciśnienie robocze, wynosi mniej niż 20% SMYS) gazu ziemnego, awarie wywołane wodorem nie stanowią poważnego problemu związanego z integralnością rur stalowych. Przy tym poziomie naprężeń potencjalne ryzyko dla rur stalowych o niskiej wytrzymałości w systemie dystrybucji jest niskie.

W przypadku innych rur metalowych – w tym **rur z żeliwa sferoidalnego oraz rur miedzianych** – **nie ma obaw o uszkodzenie wodorem w ogólnych warunkach pracy w systemach dystrybucji gazu ziemnego.**

Nie ma również większych obaw co do wpływu wodoru na starzenie rur z polietylenu (PE) lub polichlorku winylu (PVC) [4].

PRZENIKANIE I WYCIEKI

Wodór jest bardziej mobilny niż metan w wielu materiałach polimerowych, w tym w rurach z tworzyw sztucznych i uszczelnkach elastomerowych stosowanych w systemach dystrybucji gazu ziemnego. Współczynnik przenikania wodoru jest wyższy w przypadku większości elastomerowych materiałów uszczelniających niż w przypadku rur z tworzyw sztucznych.

- Rury mają znacznie większą powierzchnię niż uszczelnienia, więc wycieki przez plastikowe ścianki rur stanowią większość strat gazu [4].
- Szybkości przenikania wodoru są około 4 do 5 razy większe niż metanu w typowych rurach polimerowych stosowanych w amerykańskim systemie dystrybucji gazu ziemnego.
- Wycieki w systemach ze stali i żeliwa sferoidalnego występują głównie przez gwinty lub złącza mechaniczne [4].

Pomiary wycieków dla systemów dystrybucji gazu ze stali i żeliwa sferoidalnego (w tym uszczelnień i złączy) sugerują, że wskaźnik wycieku objętości dla wodoru jest około 3 razy wyższy niż dla gazu ziemnego [4].

PĘKNIĘCIA I TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA

- Stale węglowe i niskostopowe wykazują przyspieszony wzrost pęknięć zmęczeniowych i zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej po wystawieniu na działanie wodoru, nawet przy stosunkowo niskich ciśnieniach.
- Przyspieszony wzrost pęknięć zmęczeniowych jest bardziej wyraźny w temperaturach otoczenia i staje się mniej dotkliwy w podwyższonych temperaturach.
- Obecność wodoru zmniejsza próg cyklicznego współczynnika intensywności naprężeń, jak również trwałość zmęczeniową, dlatego pękanie zmęczeniowe może być problemem, jeśli w rurociągu wystąpią wahania ciśnienia [4].

WPLYW WODURU NA RUROCIĄGI PRZESYŁOWE GAZU ZIEMNEGO TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA

W pracy [5] przedstawiono wyniki badań, których celem było sprawdzenie wpływu wodoru na trwałość zmęczeniową istniejących stalowych rurociągów przesyłowych gazu ziemnego. Badania dynamiczne w pełnej skali przeprowadzono z wykorzystaniem losowo wybranego odcinka rur API 5L X70 o średnicy 20 cali i grubości ścianki 7 milimetrów z duńskiego systemu przesyłowego gazu ziemnego. Rura zawierała spoinę wykonaną metodą SMAW podczas montażu rury (linia z początku lat 80.). Założono, że jakość spoiny odpowiada duńskim liniom gazowym.

Środowisko testowe składało się w 100% z gazowego wodoru przy wahaniami ciśnienia reprezentujących dobową zmienność międzyszczytową w przesyśle gazu.

Maksymalne ciśnienie wynosiło 70 barów, natomiast amplituda ciśnienia wynosiła 30 barów.

Częstotliwość zmian cyklu ciśnienia była mniejsza niż 0,0017 Hz i każdą serię testową prowadzono przez 15 000 lub 30 000 cykli.

15 000 cykli odpowiada 40 latom pracy przy jednym cyklu ciśnieniowym dziennie.

- Spoiny obwodowe zostały sprawdzone metodą UT przed badaniem i ponownie po zakończonym badaniu. Podczas tych badań nie zaobserwowano pęknięć.
- Spoina obwodowa została rozcięta i poddana również badaniom metalograficznym. Również podczas tych badań nie znaleziono oznak pęknięć zmęczeniowych.

Testy, dynamicznie równoważne 80-letniemu okresowi zmian ciśnienia, nie wykazywały pojawienia się żadnej wady. Daje to pewne zaufanie do dodania wodoru do istniejącego duńskiego gazociągu przesyłowego pod warunkiem, że jest wolny od istotnych wad spoin.

ODPORNOŚĆ NA PĘKANIE

W ramach projektu NaturalHy [6] przeprowadzono badania w celu oceny ilościowej wpływu wodoru na odporność na pękanie i wzrost pęknięć zmęczeniowych dwóch powszechnie stosowanych stali do rurociągów przesyłowych, z których jedna (X52) jest stalą średniej wytrzymałości i była używana od wielu dziesięcioleci oraz druga, będąca materiałem o wyższej wytrzymałości (X70) nowszego pochodzenia.

Wyniki badań pokazały, że odporność na pękanie zmniejszyła się wraz ze wzrostem ciśnienia wodoru.

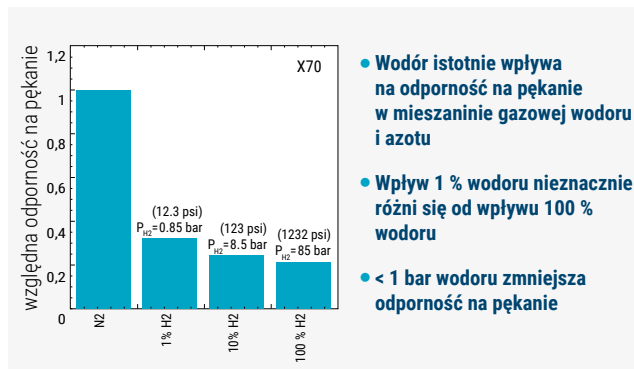
Przy typowym przesyśle (ciśnienie rurociągu 69 bar) plastyczność może zmniejszyć się o 30–50%.

Prace prowadzone w symulowanych warunkach wykazały, że mieszanka 75% gazu ziemnego i 25% wodoru byłaby akceptowalna dla materiału X70.

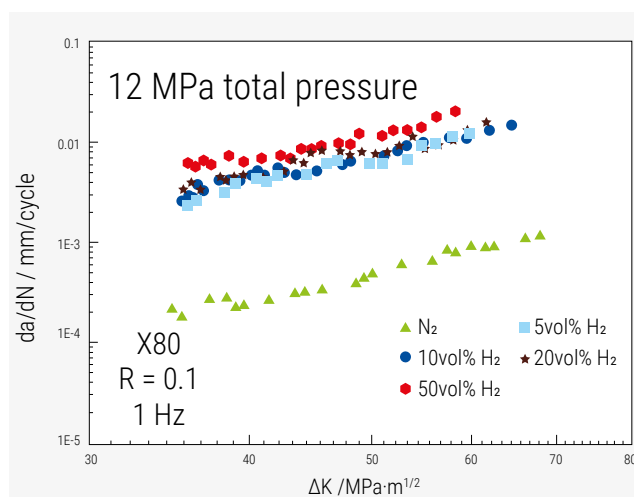
Badania wykazały też, że mieszanka 50/50 byłaby akceptowalna dla materiału X52 o niższej wytrzymałości, bez pogorszenia wytrzymałości zmęczeniowej.

WPLYW WODURU I TLENU NA ZMĘCZENIOWĄ PRĘDKOŚĆ PROPAGACJI PĘKNIĘCIA

W prezentacji [7] przedstawiono wyniki negatywnego wpływu wodoru na własności rurociągów. Dodanie niewielkiej ilości wodoru do azotu ma bardzo duży wpływ na odporność na pękanie stali rurociągowej, szczególnie przy obciążeniach zmiennych. W prezentacji tej przedstawiono również pozytywny wpływ tlenu w środowisku wodorowym na własności wytrzymałościowe podczas zmiennych obciążeń rurociągów.

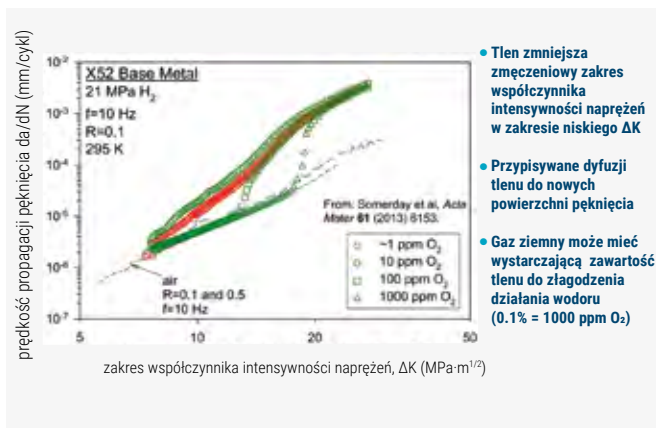


Rys. 2. Dodatek niewielkiej ilości wodoru do azotu ma bardzo duży wpływ na odporność na pękanie stali rurociągowej X70 [7]



- 5% zawartość wodoru istotnie wpływa na wzrost zmęczeniowej prędkości propagacji pęknięcia w mieszaninie gazowej wodoru i azotu
- Zwiększenie zawartości wodoru powyżej 5% nieznacznie przyspiesza zmęczeniową prędkość propagacji pęknięcia
- Małe ilości wodoru mogą mieć istotny wpływ na zmęczenie i pękanie

Rys. 3. Dodatek niewielkiej ilości wodoru do azotu ma bardzo duży wpływ na zmęczeniową prędkość propagacji pęknięcia [7]



Rys. 4. Dodatek tlenu w wodorze powoduje wyraźne złagodzenie negatywnego wpływu wodoru na zmęczeniową prędkość propagacji pęknięcia [7]

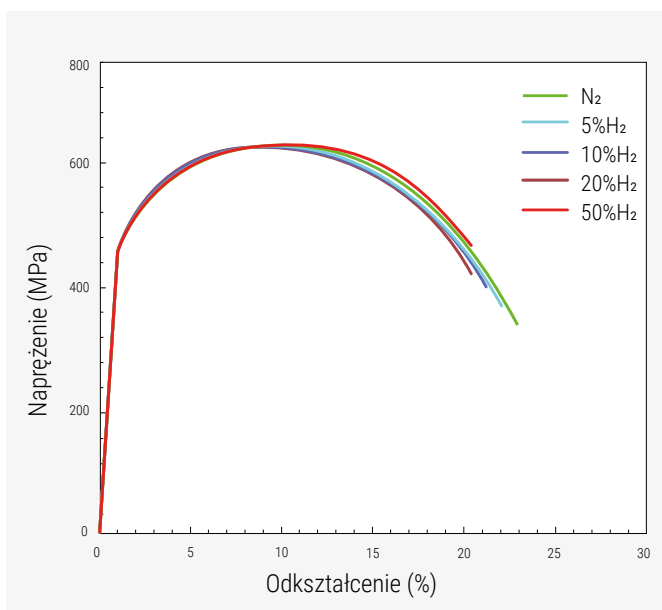
PRÓBY ROZCIĄGANIA I KRUCHOŚĆ WODOROWA

W pracy [8] opisano wyniki badań stali rurociągowej X80 w mieszaninie symulującej gaz ziemny-wodór o zawartości wodoru 0, 5, 10, 20 i 50% obj. pod ciśnieniem 12 MPa. Aby zminimalizować wpływ zanieczyszczeń i zapewnić bezpieczeństwo, gaz ziemny został zastąpiony azotem.

Próba rozciągania jest powszechnie stosowaną techniką określenia podatności materiałów na kruchość wodorową i jest użyteczną metodą przesiewową materiałów pracujących w atmosferze wodoru.

- W badaniu przeprowadzono próby rozciągania z małą szybkością (SSRT) na próbkach gładkich i z karbem, które zostały wykonane ze stali X80.
- Podczas badania określono właściwości mechaniczne, takie jak: wytrzymałość na rozciąganie, granica plastyczności, wydłużenie i przewężenie.
- Szybkość odkształcenia wynosiła 0,05 mm/min. dla próbek rozciąganych gładkich i 0,01 mm/min. dla próbek z karbem.

Wpływ stężenia wodoru na właściwości mechaniczne próbek gładkich pokazano na rysunku 5 i w tabeli 1.



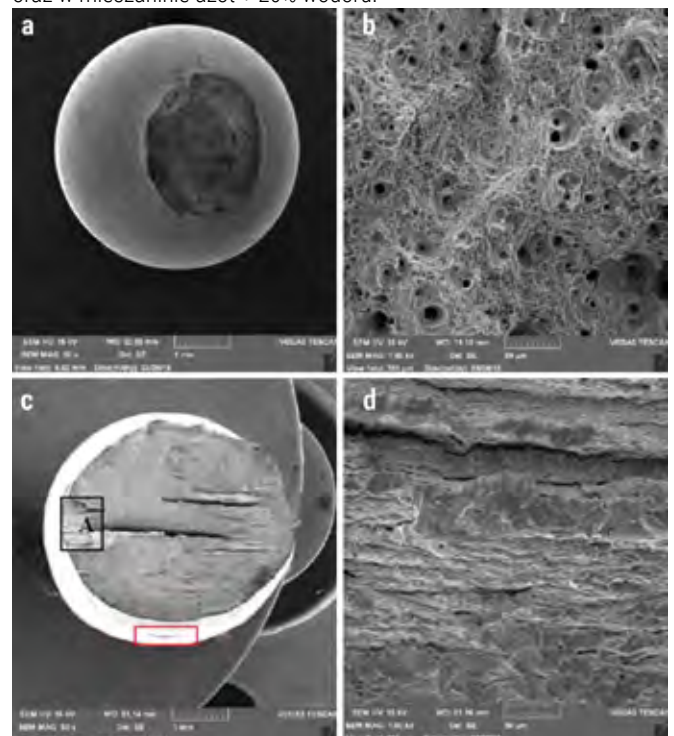
Rys. 5. Wpływ wodoru na właściwości mechaniczne próbek gładkich [8]

Tabela 1. Własności mechaniczne próbek gładkich zrywanych w atmosferze o różnym stężeniu wodoru [8]

Dodatek wodoru [% obj.]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Granica plastyczności [MPa]	Wydłużenie [%]	Przewężenie [%]
0	656,39	523,90	26,88	77,77
5	666,00	518,56	24,58	75,13
10	657,81	525,52	23,85	74,41
20	656,06	524,84	22,19	65,42
50	661,54	523,67	21,91	64,73

Otrzymane wyniki wskazują, że wodór nie ma wpływu na wytrzymałość na rozciąganie i granicę plastyczności próbek, natomiast ze wzrostem zawartości wodoru obserwuje się zmniejszenie wydłużenia i przewężenia – czyli potwierdzono zjawisko kruchości wodorowej.

Na rysunku 6 pokazano przełomy próbek zerwanych w azocie (a i b) oraz w mieszaninie azot + 20% wodoru.



Rys. 6. Przełomy próbek zrywanych w azocie (a i b) oraz mieszaninie azotu z wodorem (c i d) [8]

Po przeprowadzeniu prób rozciągania próbek z karbem w środowisku zawierającym wodór o różnych stężeniach otrzymano wyniki, które przedstawiono w tabeli 2. Na podstawie otrzymanych wyników badań widać, że ze wzrostem wodoru wzrósł parametr RNS, gdzie:

$$RNS(\%) = \left(1 - \frac{\sigma_N}{\sigma_{N0}}\right) \times 100$$

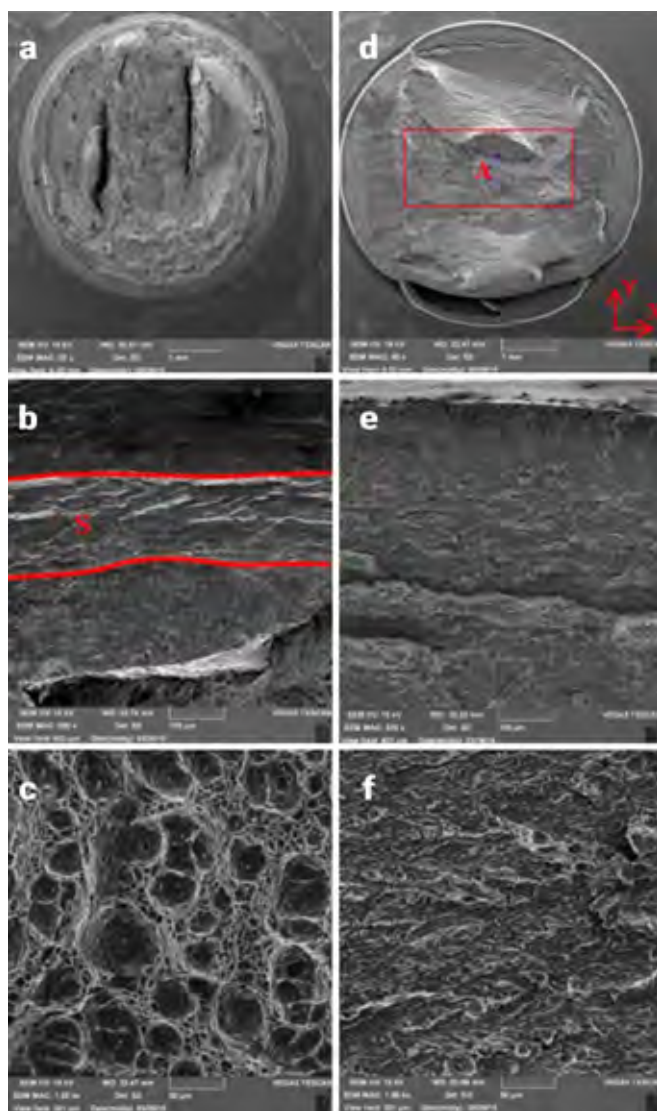
gdzie:

σ_{N0} - wytrzymałość na rozciąganie próbki z karbem rozciąganej w azocie,
 σ_N - wytrzymałość na rozciąganie próbki z karbem rozciąganej w mieszaninie azotu i wodoru o odpowiednim stężeniu.

Próbki zerwane w azocie charakteryzują się przełomem plastycznym, natomiast próbki zrywane w mieszaninie gazów azot + 20% wodoru charakteryzują się przełomem quasi-tłupliwym (rys. 7).

Tabela 2. Własności mechaniczne zerwanych próbek z karbem [8]

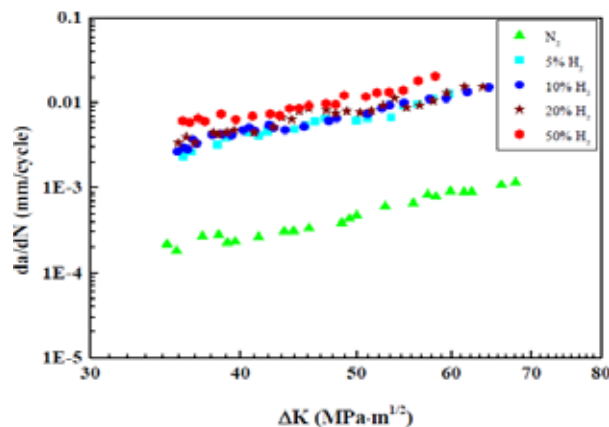
Dodatek wodoru [% obj.]	Wytrzymałość na rozciąganie próbki z karbem [MPa]	Parametr RNS [%]	Przewężenie [%]
0	1271,36	0	37,55
5	1253,49	1,41	30,41
10	1222,12	3,87	29,86
20	1190,25	6,38	22,20
50	1150,16	9,53	17,07



Rys. 7. Przełomy próbek z karbem zerwane w azocie (a, b, c) i w 20% mieszaninie wodoru i azotu [8]

W pracy [8] przedstawiono również wyniki propagacji pęknięć zmęczeniowych próbek eksponowanych w środowisku o różnym stężeniu wodoru. Próbki wykonano zgodnie z normą ASTM E647, częstotliwość obciążenia wynosiła 1 Hz, a współczynnik naprężeń wynosił 0,1 o zakre-

sie siły 19 kN. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 8, z którego widać, że szybkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych wzrasta o co najmniej rząd wielkości w mieszkach wodoru w porównaniu z azotem.



Rys. 8. Zależność da/dN względem ΔK w azocie i mieszaninach azotu z wodorem [8]

Przy odpowiednich założeniach obliczono żywotności rurociągu pracującego w warunkach cyklicznego obciążenia w środowisku azotu i mieszaninach azot + wodor [8]. Żywotność rurociągu pracującego w azocie obliczono na 783 lata, natomiast w mieszaninie azot + 5% wodoru na 68 lat. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Liczba projektowa cykli i żywotność zmęczeniowa przykładowego rurociągu [8]

Dodatek wodoru [% obj.]	0	5	10	20	50
Liczba projektowa cykli	28195	2477	2150	1872	1342
Żywotność zmęczeniowa/lata	783	68	50	52	37

W rurociągach przesyłowych gazu ziemnego, do których byłby dostarczany wodor cząsteczkowy, należy również potwierdzić lub wykluczyć występowanie wodoru atomowego, który może powstać wskutek korozji zachodzącej na wewnętrznych powierzchniach rur w obecności minimalnych ilości wody znajdującej się w przesyłanym medium, jak również wskutek procesów korozyjnych na stronie zewnętrznej rur. Zawartość siarkowodoru w medium powoduje wielokrotny wzrost nawodnienia stali [9].

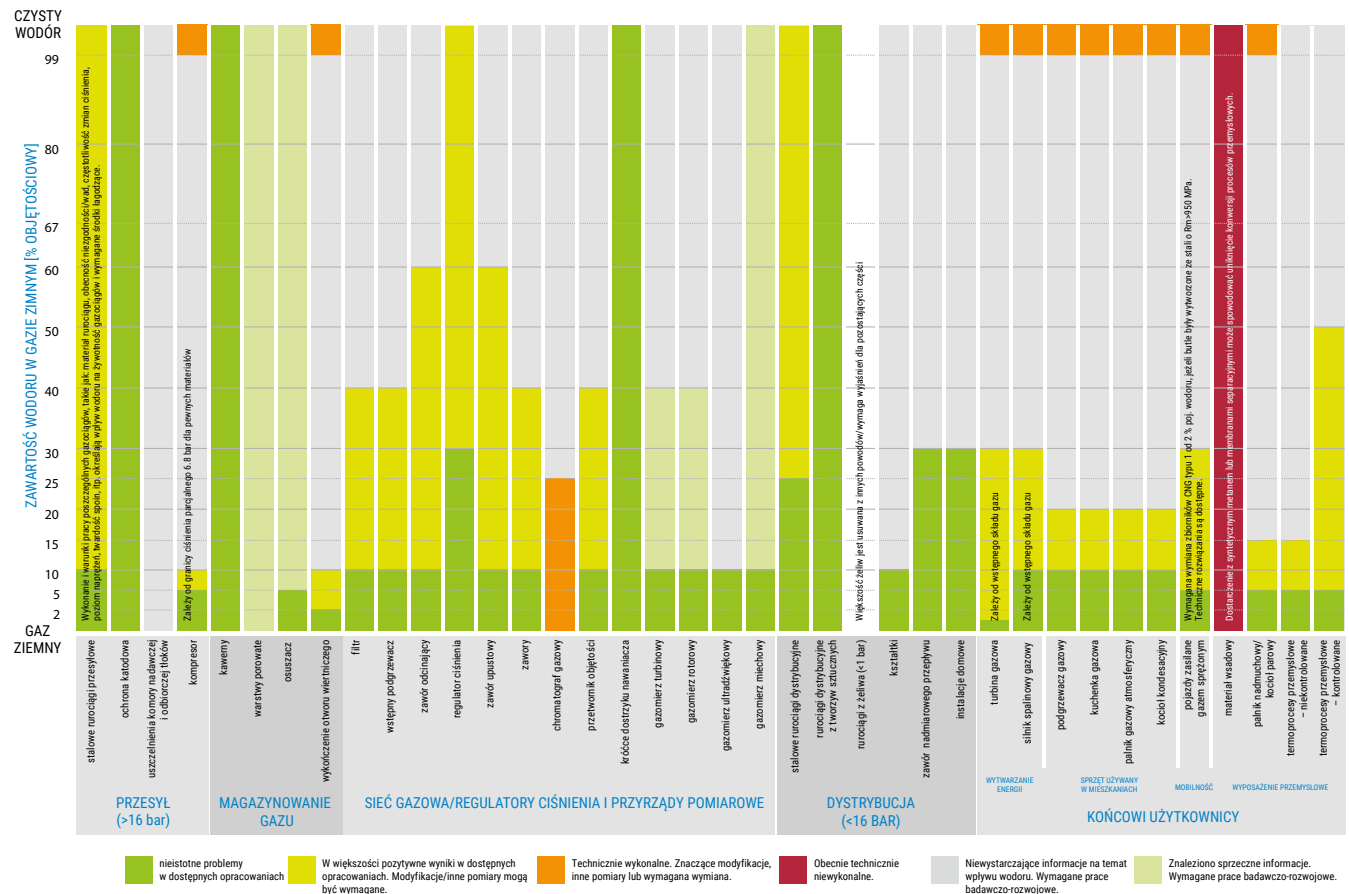
Również w publikacji [10] stwierdzono, że procesy korozyjne w glebie zachodzące z zewnętrznej strony rurociągu mogą być źródłem wodoru, który jest absorbowany przez ścianki rurociągu.

- Wodór pochłonięty przez stal jest pułapkowany i gromadzony w obszarach występowania nieciągłości materiału, w tym na granicach rozdzielania osnowa-wydzielenia niemetaliczne (głównie siarczki manganu).
- Segregacja wodoru w tych miejscach powoduje oddzielenie się siarczków od osnowy i tworzenie się pęcherzy wypełnionych przez wodor o wysokim ciśnieniu.
- **KUMULACJA WODORU W PĘCHERZACH PROWADZI DO ICH ROZROSTU I ŁĄCZENIA SIĘ ORAZ POWSTANIA WEWNĘTRZNYCH ODKSZTAŁCEŃ [9].**

Obecnie na całym świecie trwają prace mające na celu zbadanie wpływu wodoru, który byłby dodawany do gazu ziemnego, na infrastrukturę, która obecnie jest wykorzystywana do przesyłu gazu ziemnego. Przykładem jest działalność konsorcjum H-Mat (Hydrogen Materials Compatibility Consortium) działającego na terenie USA czy centrum badawczego Future Fuels Cooperative Research Centre w Australii.

ARMATURA I ZAWORY

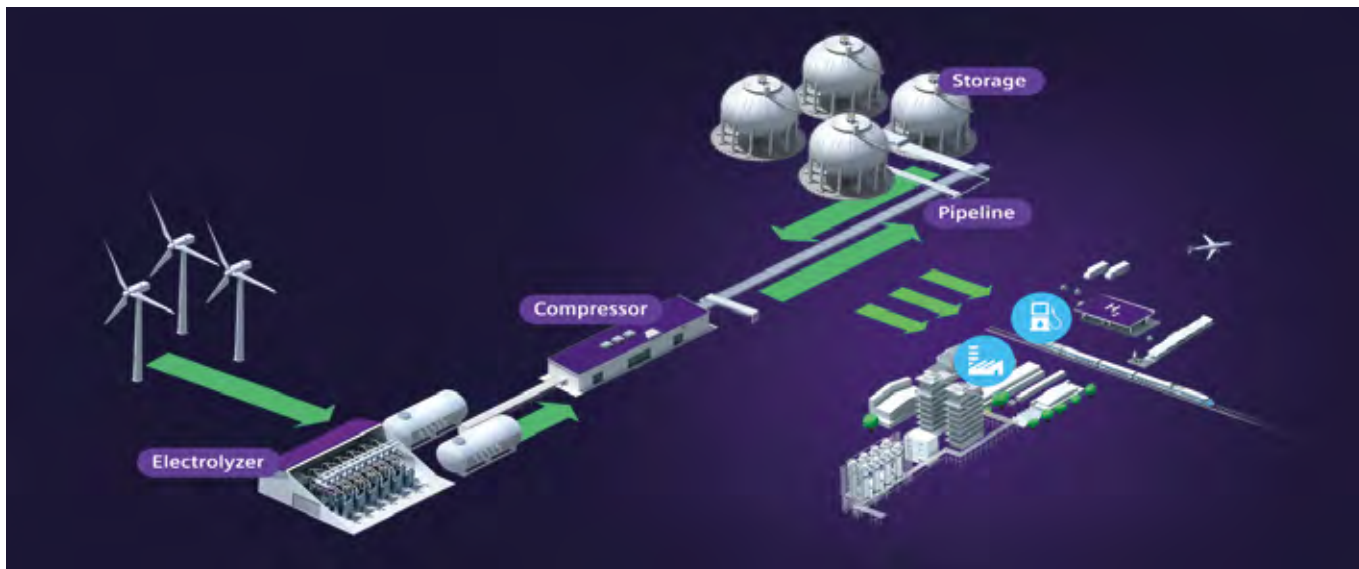
Na rysunku 9. przedstawiono dopuszczalne stężenia wodoru dostrzykiwanego do gazu ziemnego np. dla zaworów. Nie znaleziono szczegółowych wyników badań wpływu wodoru na uszczelnienia armatury. Na stronach producentów [np. 11] zaworów odcinających, stosowanych do rurociągów transportujących wodór w temperaturach otoczenia, podkreślane są informacje, że materiały stosowane na zawory muszą charakteryzować się odpornością na kruchość wodorową oraz wysoką szczelnością ze względu na wysoką zdolność penetrowania wodoru.



Rys. 9. Przegląd wyników badań i dopuszczeń prawnych związanych z dodaniem wodoru do istniejącej infrastruktury gazu ziemnego (margogaz). Uwaga: Dane od każdego operatora należy traktować jako najlepsze źródło informacji o limitach dopuszczania wodoru [12]

1,2 MLN KM INFRASTRUKTURY PRZESYŁOWEJ - 30-KROTNOŚĆ OBWODU ZIEMI

- Źródłem wodoru, który będzie oddziaływał na własności materiału gazociągów, może być **WODÓR ATOMOWY** powstający z wilgotnego siarkowodoru, znajdujący się w gazie ziemnym, oraz procesy korozyjne od strony zakopanego w glebie rurociągu.
- Dla systemu gazociągów **należałoby określić dokładny SKŁAD CHEMICZNY GAZU ZIEMNEGO (ze szczególnym uwzględnieniem zawartości siarkowodoru i wody w postaci ciekłej) oraz możliwość zagrożenia niszczenia wodorowego rurociągów od strony zewnętrznej (gleby).**
- **WODÓR CZĄSTECZKOWY ma negatywny wpływ na własności zmęczeniowe stali** stosowanych do budowy rurociągów. Obserwowano korzystny wpływ dodatku tlenu do wodoru na własności zmęczeniowe materiałów.
- **Nie tylko wodór atomowy, ale również wodór cząsteczkowy ma wpływ na KRUCHOŚĆ WODOROWĄ STALI.** Zgodnie z dokumentem [13] w wypadku gdy do gazu ziemnego dodamy 10% wodoru, to należy ocenić podatność stali na kruchość wodorową w następujących przypadkach:
 - ciśnienie operacyjne jest wyższe niż 30 barów i/lub,
 - naprężenia rurociągu są wyższe niż 20% granicy plastyczności materiału i/lub,
 - zastosowano stale o wysokiej wytrzymałości.



Według Global Energy Monitor, na Świecie istnieje blisko 2,5 tys. rurociągów gazowych, tworzących sieć o łącznej długości stanowiącej blisko 1,2 mln km, co wystarczy, aby okrążyć Ziemię blisko 30 razy [14].

W przedstawionym w kwietniu br. raporcie, opublikowanym przez European Hydrogen Backbone (EHB) – inicjatywy zrzeszającej 31 operatorów infrastruktury energetycznej – zakłada się powstanie na terenie Europy ok. 53 000 km rurociągów do 2040 roku, w tym 60% to modernizacja istniejącej infrastruktury przesyłowej gazu ziemnego [15].

MIĘDZYNARODOWE DZIAŁANIA MOGĄ ZWIĘKSZYĆ SKALĘ WYKORZYSTANIA WODORU, TAK ABY STAŁ SIĘ KLUCZOWYM ELEMENTEM CZYSTEJ PRZYSZŁOŚCI I BEZPIECZNEJ ENERGII. WYKORZYSTANIE POTENCJAŁU ISTNIEJĄCYCH SIECI DYSTRYBUCJI GAZU ZIEMNEGO MOŻE ZNACZĄCO WPŁYNAĆ NIE TYLKO NA CENĘ, ALE TAKŻE OGÓLNA DOSTĘPNOŚĆ ZIELONEGO WODORU. WŁAŚCIWY CZAS, ABY WYKORZYSTAĆ POTENCJAŁ WODORU DO ODGRYWANIA KLUCZOWEJ ROLI W CZYSTEJ, BEZPIECZNEJ I PRZYSTĘPNEJ CENOWO PRZYSZŁOŚCI ENERGETYCZNEJ, WŁAŚNIE NADSZEDŁ.

W jaki sposób poszczególne kraje, w tym Polska, realizują strategie związane z gospodarką wodorową oraz które obszary stanowią szczególne zainteresowanie, będą mogli Państwo śledzić na łamach kolejnych numerów naszego biuletynu.

Literatura:

- https://klasterwodorowy.pl/images/zdjecia/9_Analiza_potencjalu_tehnologii_wodorowych_opracowanie.pdf
- Holewa-Rataj J., Kukulska-Zajęc E., Wpływ dodatku wodoru na liczbę metanową gazu ziemnego, „Nafta-Gaz 2020”, nr 12, s. 945–950.
- Jaworski J., Kukulska-Zajęc E., Kułaga P., Wybrane zagadnienia dotyczące wpływu dodatku wodoru do gazu ziemnego na elementy systemu gazownicze-go, „Nafta-Gaz 2019”, nr 10, s. 625–632, DOI: 10.18668/NG.2019.10.04.
- Melaina M.W., Antonia O., Penev M., Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues, Technical Report NREL/TP-5600-51995, March 2013.
- Iskov H., Field test of hydrogen in the natural gas grid, Project Report, August 2010, Danish Gas Technology Centre.
- Injecting hydrogen into the gas network – a literature search. Prepared by the Health and Safety Laboratory for the Health and Safety Executive, 2015.
- <https://www.osti.gov/servlets/purl/1646101>, prezentacja: Ronevich J. and Marchi Ch.S., Sandia National Laboratories, Livermore, Hydrogen Effects on Pipeline Steels and Blending into Natural Gas, November 2019.
- Meng, B. 1,2, Gu C.H.1,2, Zhang L.3, Zhou, C.S.3, Zhao, Y.Z.1,2, Zheng, J.Y.1,2,4*, Chen, X.Y.3, Han, Y., HYDROGEN EFFECTS ON X80 PIPELINE STEEL UNDER HIGH-PRESSURE NATURAL GAS/HYDROGEN MIXTURES, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 42, Issue 11, 16, March 2017, pages 7404-7412 (https://h2tools.org/sites/default/files/ICHS_import/paper_344.pdf).
- Łunarska E., Korozja wodorowa w instalacjach i rurociągach przemysłowych. Jej monitorowanie i zapobieganie, Mater. IV Krajowej Konferencji Korozyjnej KOROZJA'93, IChF PAN, Warszawa 1993, s. 8–13.
- Capelle J., Gilgert J., Dmytrakh I., Pluvinage G., Sensitivity of pipelines with steel API X52 to hydrogen embrittlement, International Journal of Hydrogen Energy, Elsevier, 2008, 33 (24), pp. 7630–7641. 10.1016/j.ijhydene.2008.09.020. hal-02970925
- <https://h2.hartmann-valves.com/?lang=en>
- https://www.gie.eu/wpcontent/uploads/filr/3429/entsog_gie_he_QandA_hydrogen_transport_and_storage_210521.pdf
- <https://energyministers.gov.au/sites/prod.energycouncil/files/publications/documents/Hydrogen%20Impacts%20on%20Downstream%20Installations%20Appliances%20Report%202019.pdf>
- <https://globalenergymonitor.org/projects/global-fossil-infrastructure-tracker/>
- <https://ehb.eu/files/downloads/ehb-report-220428-17h00-interactive-1.pdf>