

Zastosowanie metodologii RBI do doboru metod NDT w diagnostyce urządzeń technicznych podlegających dozorowi UDT

RBI methodology application in selection of NDT methods in the diagnostics of technical equipment under inspection of office of technical inspection

Streszczenie

Artykuł dotyczy wykorzystania metodologii RBI (*Risk Based Inspection*) w ustalaniu aktywności mechanizmów degradacji urządzeń ciśnieniowych i odpowiednim doborze metod NDT w tworzeniu programów inspekcji.

Opisano zasady RBI oraz omówiono aspekty utrzymywania integralności mechanicznej urządzeń ciśnieniowych w przemyśle petrochemicznym. Omówiono zależność doboru metod NDT od spodziewanych rodzajów uszkodzeń urządzeń ciśnieniowych wykonanych z metali. Omówiono parametry materiału konstrukcyjnego oraz fizykochemiczne parametry medium procesowego, mające znaczenie w aktywności mechanizmów degradacji urządzeń ciśnieniowych. Na przykładzie stali niskostopowej Cr-Mo omówiono przyczyny zagrożenia siarczkowym pękaniem naprężeniowym.

Odniesiono się do istotności doboru standardów projektowych oraz do doboru kryteriów akceptacji badań NDT na etapie wytwarzania i eksploatacji z zastosowaniem przewidywania aktywności mechanizmów degradacji przy doborze metod inspekcyjnych. Zaproponowano rozszerzone wymagania dotyczące opracowania badań NDT na etapie eksploatacji.

Abstract

Article relates to the use of the RBI (Risk Based Inspection) methodology in determining of active degradation mechanisms of pressure equipment and the suitable choice of NDT methods in development of the inspection programs.

It describes RBI rules and discusses aspects of maintaining the mechanical integrity of the pressure equipment in petrochemical industry. Discusses dependency of NDT methods selection on the expected failure modes of pressure equipment. Discusses the parameters of the material of construction and physico-chemical parameters of the process medium and their impact on the degradation mechanisms activity in pressure equipment. Discussion was carried out on the example of sulfide stress cracking of Cr-Mo low-alloy steel.

Article points out the importance of selection of design standards and acceptance criteria during selection of the NDT methods at the production, and later at operational stage, using prediction of degradation mechanisms activity. The article suggests the need for expanded reporting requirements of NDT during operational stage of pressure equipment.

Co to jest RBI?

RBI (Risk Based Inspection) jest metodą planowania inspekcji i zarządzania programem inspekcji, wykorzystującą wyniki analiz ryzyka, mającą na celu redukcję ryzyka związanego z eksploatacją urządzeń ciśnieniowych.

Metodologia RBI opiera się na standardach API i jest kierowana głównie do sektora przemysłu petrochemicznego. Można ją jednak adaptować do innych sektorów, np. chemii procesowej, energetyki czy gazownictwa, po scharakteryzowaniu mechanizmów degradacji urządzeń w tych sektorach.

Integralność mechaniczna urządzeń

Integralność mechaniczna urządzeń zależy od właściwego dopasowania urządzenia do jego przeznaczenia – a więc możliwości jego bezpiecznej pracy w warunkach normalnych i awaryjnych, na które jest narażone, oraz od kontroli jego degradacji następującej w wyniku eksploatacji i podejmowania odpowiednich działań naprawczych.

Jako *degradację urządzenia* rozumiemy obniżenie niezawodności urządzenia w pełnieniu zaprojektowanej funkcji utrzymywania zawartych w nim mediów. Oprócz uszkodzeń przypadkowych, degradacja urządzenia ciśnieniowego może być spowodowana oddziaływaniem mechanizmów degradacji wynikających z trzech grup czynników: materiału konstrukcyjnego i technologii wykonania urządzenia ciśnieniowego, środowiska chemicznego medium roboczego oraz parametrów fizycznych tego środowiska, tj. ciśnienia, temperatury, przepływu, itp.

Mechanizmy degradacji

W standardach technicznych, w zależności od przeznaczenia standardu i wymaganej szczegółowości analizy, wymienia się około 70 mechanizmów degradacji występujących w przemyśle [1].

Standard API 581:2008 zawiera procedury obliczeniowe dla 33 najczęściej spotykanych mechanizmów degradacji. W niektórych przypadkach, w celu uproszczenia analizy, mechanizmy zostały pogrupowane, np. w grupie 1 – pocienienia (tabl. I), zostało zgrupowanych 13 mechanizmów powodujących lokalne lub powierzchniowe ubytki materiału. Do celów niniejszego artykułu również mechanizmy korozyjnego pęknięcia naprężeniowego (9 mechanizmów powodujących głównie pęknięcia powierzchniowe) połączono w grupę nr 3.

Tablica I. Zestawienie ważniejszych grup mechanizmów degradacji
Table I. Summary of the most important groups of degradation mechanisms

Lp.	Grupa mechanizmów degradacji
1	Pocienienia (korozyja ogólna i lokalna)
2	Uszkodzenia elementów z wykładzinami
3	Korozyjne pęknięcie naprężeniowe
4	Zewnętrzne chlorkowe korozyjne pęknięcie naprężeniowe – stale austenityczne
5	Korozyja zewnętrzna – stale ferrytyczne / austenityczne
6	Korozyja pod izolacją – stale ferrytyczne / austenityczne
7	Wysokotemperaturowy atak wodorowy
8	Krucze pęknięcie
9	Kruchość z powodu starzenia wysokotemperaturowego
10	Kruchość w temperaturze 473°C
11	Kruchość fazy sigma
12	Uszkodzenia wynikające ze zmęczenia mechanicznego rurociągów

W zależności od mechanizmu degradacji wyróżnia się następujące rodzaje uszkodzeń (*failure modes*) urządzeń ciśnieniowych wykonanych z metali:

- pocienienia (ogólne i miejscowe oraz pitting),
- pęknięcia powierzchniowe,
- pęknięcia podpowierzchniowe,
- mikropęknięcia i mikropory,
- zmiany metalurgiczne,
- zmiany wymiarowe,
- pęcherze,
- zmiany właściwości materiałowych.

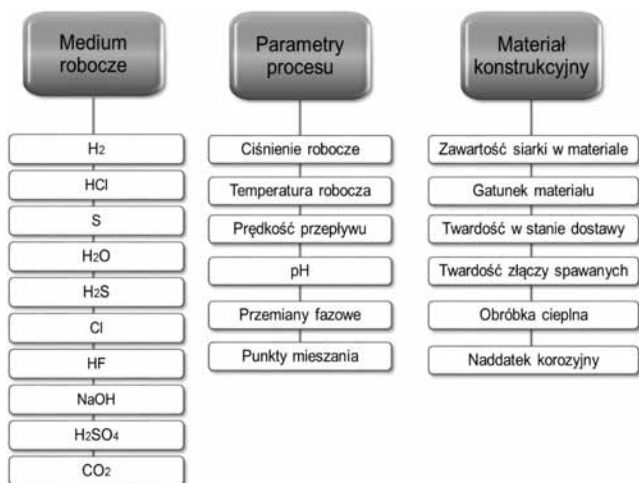
Skutki utraty integralności mechanicznej mogą być różne, w zależności od sposobu uszkodzenia, np. ograniczone przy małej perforacji powłoki lub katastrofalne przy rozerwaniu urządzenia ciśnieniowego.

Każdy mechanizm degradacji ma swoją specyfikę oddziaływania. Ustalanie, z jakim mechanizmem degradacji możemy mieć do czynienia, jest prowadzone na podstawie analizy środowiska i warunków pracy urządzenia oraz ich oddziaływania na materiał konstrukcyjny. Z punktu widzenia aktywności i intensywności mechanizmów degradacji tzw. *parametrami znaczącymi* urządzenia ciśnieniowego są m.in. cechy konstrukcyjne urządzenia ciśnieniowego, właściwości medium roboczego oraz parametry procesu mające istotny wpływ na aktywność mechanizmów degradacji.

Prowadząc analizę RBI, dokonuje się oceny aktywności poszczególnych mechanizmów degradacji na podstawie znanych kryteriów materiałowych i warto-

ści parametrów procesowych oraz obliczenia ich intensywności i podatności urządzenia na pojedyncze mechanizmy degradacji (t.j.: korozja powierzchniowa, zmęczenie, pękanie naprężeniowe) lub grupy tych mechanizmów.

Aktualne warunki pracy oraz cechy konstrukcyjne urządzenia decydują o aktywności mechanizmów degradacji. Aktywność mechanizmów degradacji i podatność urządzenia oraz jego aktualny stan techniczny decydują o prawdopodobieństwie utraty integralności mechanicznej. To prawdopodobieństwo w powiązaniu



Rys. 1. Parametry znaczące mające istotny wpływ na aktywność mechanizmów degradacji urządzeń ciśnieniowych

Fig. 1. Significant parameters which affect the activity of degradation mechanisms of pressure equipment

z możliwymi skutkami utraty integralności mechanicznej (uwolnienie energii, uwolnienie czynnika itp.) określają ryzyko przypisane do eksploatacji danego urządzenia.

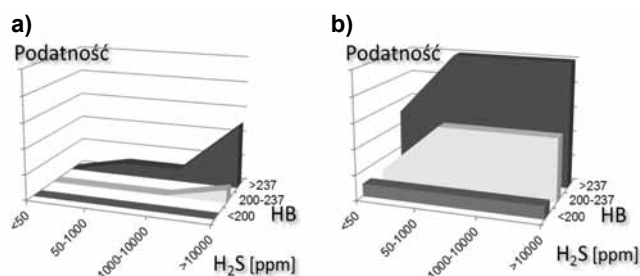
Warunkami koniecznymi występowania mechanizmów pękania, oprócz środowiska korozyjnego sprzyjającego oddziaływaniu na materiał, są: podwyższona twardość materiału oraz koncentracja naprężeń wynikająca np. z braku lub niewłaściwej obróbki cieplnej po procesie spawania lub innym procesie, np. obróbki plastycznej materiału. W miejscach występowania tych czynników podatność na pękanie wzrasta wielokrotnie. Na rysunku 2 przedstawiono porównanie wykresów podatności stali niskostopowej Cr-Mo na siarczkowe pękanie naprężeniowe (*Sulfide Stress Cracking* – SSC) w zależności od zawartości H₂S w wodzie (o odczynie pH = 8,5) zawartej w medium roboczym oraz od twardości materiału i faktu wykonania lub braku obróbki cieplnej (PWHT). Dodatkowym warunkiem rozwoju tego mechanizmu degradacji jest obecność nawet niewielkich ilości wody w medium roboczym w kontakcie z materiałem konstrukcyjnym.

Przeznaczenie urządzenia, czyli tzw. serwis, jest istotnym aspektem doboru standardów projektowych i powinno być ważnym kryterium doboru metod i zakresów NDT w kontroli jakości na etapie wytwarzania.

Dobór metod inspekcji

Zadaniem służb nadzoru eksploatacyjnego urządzeń jest takie określenie metod diagnostycznych, aby wszelkiego rodzaju uszkodzenia eksploatacyjne były wykrywane przed utratą integralności mechanicznej.

Optymalnym rozwiązaniem określania metod diagnostycznych jest oparte na wieloletniej praktyce API (*American Petroleum Institute*) przewidywanie aktywności mechanizmów degradacji oraz odpowiedni dobór



Rys. 2. Porównanie podatności materiału z stali niskostopowej Cr-Mo na siarczkowe pękanie naprężeniowe w zależności od zawartości H₂S w wodzie (o odczynie pH=8,5) zawartej w medium roboczym, przy różnych twardościach materiału: a) materiał poddany PWHT; b) materiał bez PWHT; (dane na podstawie [2])

Fig. 2. Comparison of the susceptibility of Cr-Mo low alloy steel on the sulfide stress cracking, depending on the H₂S content of water (at pH=8.5) in the process medium at different hardness of the material: a) after PWHT; b) without PWHT; (data from [2])

metod inspekcyjnych (rodzaj, częstotliwość, miejsca i zakres badań, sposób przygotowania urządzenia), umożliwiając wykrycie rozwijającego się uszkodzenia, zanim doprowadzi ono do rozszczelnienia urządzenia.

Warunkiem poprawnego nadzorowania urządzeń ciśnieniowych jest precyzyjne określenie parametrów znaczących dla danego urządzenia ciśnieniowego oraz ich wartości granicznych, a także wymaganej częstotliwości badań, która jest istotna ze względu na dużą szybkość działania niektórych mechanizmów degradacji, zależną od stopnia przekroczenia limitu danego parametru, np. zawartości H₂S lub zawartości wody w medium roboczym, zwiększonej twardości spoiny, itp.

W przypadku wykrycia w urządzeniu objawów siarczkowej korozji naprężeniowej, zalecenia badań będą dotyczyły metod właściwych dla rodzaju uszkodzeń powodowanego przez ten mechanizm degradacji – w tym wypadku pęknięć. W tabelicy II przedstawiono w uproszczony sposób powiązanie rodzajów uszkodzeń materiału z kilkoma metodami badań niszczących, podając równocześnie ich efektywność (czułość) na dany rodzaj uszkodzeń.

Jako przykład doboru metod inspekcji może posłużyć omawiana wcześniej korozja SSC. Jeśli materiał konstrukcyjny urządzenia ciśnieniowego ma podwyższoną twardość, np. 238 HB przy wartości akceptowalnej wynoszącej 241 HB (wg ASME) oraz jeśli wystąpią dwa pozostałe czynniki, czyli medium z H₂S

i wodą oraz koncentracja naprężeń, to wysoce prawdopodobne jest występowanie pęknięć powierzchniowych w strefach wpływu ciepła lub w sąsiedztwie ewentualnych wtrąceń w spoinach materiału.

W przypadku stwierdzenia możliwości występowania w urządzeniu tego rodzaju uszkodzeń badanie całej powierzchni urządzenia nie byłoby racjonalnym zaleceniem. Znając konstrukcję urządzenia ciśnieniowego i warunki jego pracy, w zależności od możliwości dostępu do przewidywanych miejsc występowania uszkodzeń, należy zalecić wykonanie badań jedną z metod przedstawionych w tablicy II w poz. 3÷7 w celu oceny stanu technicznego urządzenia. W przypadku wykrycia przewidywanych uszkodzeń, oprócz zaleceń dotyczących naprawy, celowe jest podjęcie innych działań, tj. monitorowanie czynników znaczących zidentyfikowanego mechanizmu degradacji (m.in. obecności i odczynu chemicznego wody w medium oraz stężenia H₂S) oraz działań redukujących ryzyko rozwoju mechanizmu degradacji, np. fizycznych lub chemicznych metod eliminacji wody z medium roboczego

W ten sam sposób należy postępować, analizując możliwe występowanie innych mechanizmów degradacji.

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy wymiennik płaszczowo-rurowy – widok zewnętrzny płaszcza i poniżej widok wkładu rurowego. Zaznaczono też

przykładowe miejsca występowania uszkodzeń spowodowanych mechanizmami degradacji, z których część jest możliwa do wykrycia w ramach badań wizualnych podczas rewizji wewnętrznej urządzenia, a część wymaga wykorzystania innych technik NDT.

Kryteria akceptacji NDT

W zastosowaniu do inspekcji prowadzonych na etapie eksploatacji urządzenia ciśnieniowego, mających na celu wykrycie i ocenę aktywności mechanizmów degradacji, standardowe kryteria akceptacji, np. wg EN5817, mogą mieć ograniczone zastosowanie. W tym przypadku istotna jest obecność lub brak poszukiwanych wskazań oraz ich ocena wymiarowa.

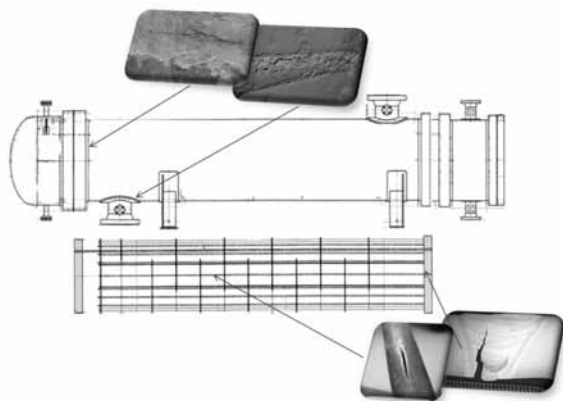
Nawet w przypadku, gdy zostanie wykryta niezgodność produkcyjna, nie mieszcząca się w założonym w produkcji kryterium akceptacji, z którą urządzenie trafiło do eksploatacji w wyniku błędu w kontroli jakości, a nie jest ona czynnikiem sprzyjającym rozwojowi żadnego z przewidywanych mechanizmów degradacji, to nie jest ona wskazaniem dyskwalifikującym urządzenie z eksploatacji. Oczywiście powinna być ona usunięta wówczas, gdy może stwarzać zagrożenie w dalszej eksploatacji, np. obniżyć wytrzymałość powłoki ciśnieniowej. Ważne jest natomiast, aby

Tablica II. Uprozczone powiązanie rodzajów uszkodzeń materiału z metodami NDT [3]

Table II. Simplified relationship between failure modes of the material with NDT methods [3]

Lp.	Technika inspekcyjna	Pocienienia	Pęknięcia powierzchniowe	Pęknięcia podpowierzchniowe	Mikropęknięcia i mikropory	Zmiany metalurgiczne	Zmiany wymiarowe	Pęcherze
1	Badania wizualne (VT)	A-C	B-C	X	X	X	A-C	A-C
2	Badania UT (fala prosta)	A-C	C-X	C-X	B-C	X	X	A-B
3	Badania UT (fala skośna)	X	A-B	A-B	B-C	X	X	X
4	Fluorescencyjne, magnetyczno-proszkowe (MT)	X	A-B	C-X	X	X	X	X
5	Badania penetracyjne (PT)	X	A-C	X	X	X	X	X
6	Emisja akustyczna (AE)	X	A-C	A-C	C-X	X	X	C-X
7	Prądy wirowe (Eddy Current)	A-B	A-B	A-B	C-X	X	X	X
8	Badania MFL (Magnetic Flux Leakage)	A-B	X	X	X	X	X	X
9	Badania radiograficzne (RT)	A-C	C-X	C-X	X	X	A-B	X
10	Badania wymiarowe	A-C	X	X	X	X	A-B	X
11	Metalografia	X	B-C	B-C	B-C	A-B	X	X

A – bardzo efektywna; B – mało efektywna; C – ewentualnie/nie w każdym przypadku efektywna; X – niestosowana



Rys. 3. Przykładowy wymiennik płaszczowo-rurowy – widok zewnętrzny płaszcza i poniżej widok wkładu rurowego – prawdopodobne miejsca występowania uszkodzeń spowodowanych mechanizmami degradacji

Fig. 3. An example of a shell-tube heat exchanger – an external view of the mantle and view of a tube side. Probable locations of damage caused by the degradation mechanisms

wyeliminować nawet akceptowalne niezgodności spawalnicze, jeżeli w eksploatacji mogą stać się zagrożeniem któregoś z mechanizmów degradacji.

W eksploatacyjnej diagnostyce mechanizmów degradacji celem jest poszukiwanie wskazań świadczących

o aktywności przewidywanych w danych warunkach mechanizmów degradacji oraz ocena tych wskazań.

Jeżeli wykryto wskazania metodami dobranymi do występujących mechanizmów degradacji, to niezależnie od rozmiarów niezgodności lub uszkodzenia należy je umieścić w raporcie, a następnie poddać ocenie pod względem założonej aktywności mechanizmów degradacji. W razie potrzeby należy rozszerzyć zakres badań, aby ocenić skalę oddziaływania mechanizmów degradacji.

W przypadku mechanizmów wywołujących pęknięcia kryterium akceptacji badań jest brak wskazań, a w przypadku pocienień są to wskazania o grubości ścianki większej niż minimalna oraz o prędkości korozji mniejszej lub równej od założonej.

W kontekście omawianych mechanizmów degradacji zwraca uwagę fakt, jak istotne jest określenie przez zamawiającego urządzenie ciśnieniowe warunków pracy danego urządzenia i, jeśli nie jest to rolą projektanta, także określenie indywidualnych kryteriów akceptacji na podstawie analizy potencjalnie aktywnych mechanizmów degradacji. Przy określaniu kryteriów akceptacji na etapie wytwarzania urządzeń ciśnieniowych dla przemysłu należy bezwzględnie brać pod uwagę nie tylko wytrzymałość konstrukcji ze względu na obciążenie ciśnieniem, wiatrem, gruntem, itp., ale także możliwe do przewidzenia odchylenia od standardowego składu medium procesowego czy parametrów procesowych i położyć odpowiedni nacisk na proces wytwarzania a następnie na reżimy eksploatacji.

Podsumowanie

Omawiana metodologia RBI jest obszernym źródłem wskazówek do działalności inspekcyjnej, a jej najcenniejszym aspektem jest możliwość ilościowej oceny intensywności mechanizmów degradacji, prowadzonej na podstawie szczegółowej znajomości konstrukcji urządzeń ciśnieniowych i znajomości procesów fizykochemicznych zachodzących w tych urządzeniach.

Na podstawie standardów technicznych serii API 580 i API 581 możemy zastosować w urządzeniach ciśnieniowych zweryfikowane i uznane w praktyce metody kryterialnego typowania potencjalnie aktywnych mechanizmów degradacji, ustalania możliwych miejsc ich występowania oraz ilościowej oceny intensywności tych mechanizmów. Odpowiednio opracowane standardy techniczne pozwalają na dobór precyzyjnych programów diagnostycznych, często przy ograniczeniu inwazyjności inspekcji, a więc konieczności zatrzymywania wyposażenia procesowego, do niezbędnego minimum. Daje to korzyści w postaci lepszej dostępności wyposażenia technicznego użytkownika, a więc

wzrostu konkurencyjności produkcji, rozwijając jednocześnie warsztat inspekcyjny UDT.

Inspekcje oparte na analizie ryzyka mogą być nowym, innowacyjnym obszarem współpracy UDT z przemysłem, który dzięki zastosowaniu RBI może się lepiej dopasować do potrzeb przemysłu, zachowując jednocześnie wysoki poziom bezpieczeństwa technicznego. Wyniki wstępnych analiz i badań pokazują, że w przypadku niektórych urządzeń, przy zastosowaniu dodatkowych metod inspekcji w celu monitorowania ich stanu technicznego, jest możliwe wydłużenie terminów pomiędzy postojami urządzeń bez wzrostu ryzyka ich uszkodzenia.

Połączenie technik inspekcji oraz wymagań dotyczących monitorowania procesu technologicznego pod względem czynników znaczących dla aktywności spodziewanych mechanizmów degradacji prowadzi do racjonalnego i wysoce efektywnego doboru metod inspekcyjnych w wykonywaniu dozoru urządzeń ciśnieniowych.

Literatura

- [1] API RP 571 – Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry, Second Edition (April 2011).
[2] API RP 581 – Risk-Based Inspection Technology, Second Edition (September 2008).

- [3] API RP 580 – Risk-Based Inspection; Base Resource Document, First Edition (May 2000).