

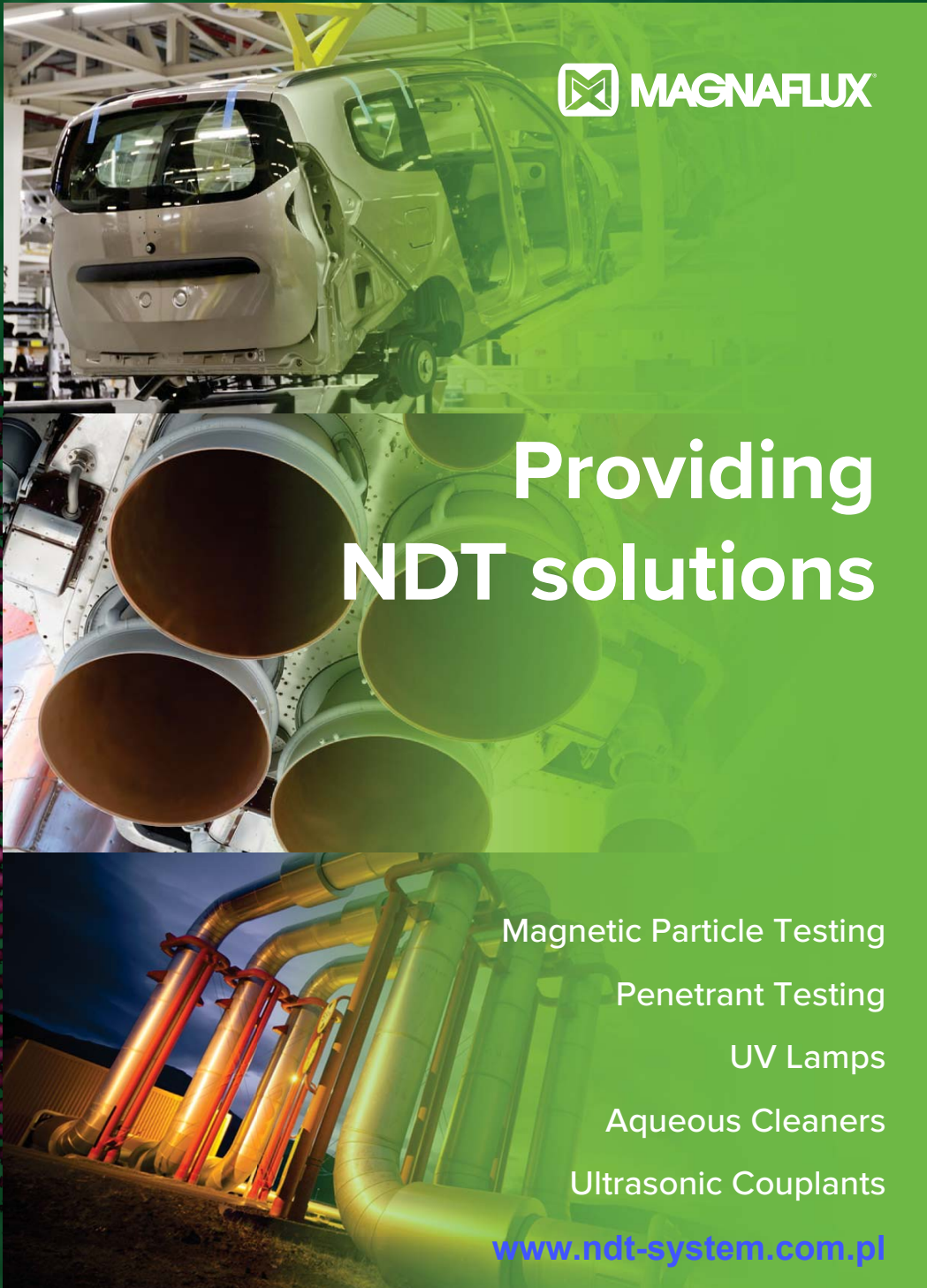
# Badania Nieniszczące 1 - 4 / 2023 i Diagnostyka


Kwartalnik Naukowo-Techniczny

Nondestructive Testing and Diagnostics

## 50. KKBN

[www.kkbn.pl](http://www.kkbn.pl)



 MAGNAFLUX

### Providing NDT solutions

- Magnetic Particle Testing
- Penetrant Testing
- UV Lamps
- Aqueous Cleaners
- Ultrasonic Couplants

[www.ndt-system.com.pl](http://www.ndt-system.com.pl)

## DXR75P-HR

### Mały system obrazowania o najwyższej rozdzielczości do krytycznych zastosowań

Detektor DXR75P-HR daje wysoką rozdzielczość pikseli 75  $\mu\text{m}$ , wymaganą do rozróżnienia drobnych szczegółów w krytycznych zastosowaniach. Detektor obejmuje kontrolę spoin klasy B według ISO 17636-2, dając precyzyjne obrazy spełniające najostrzejsze wymagania.



Dzięki małej szerokości detektor jest idealny do tworzenia obrazów w sytuacjach o ograniczonej swobodzie ustawienia.

DXR75P-HR jest odpowiedni do zastosowań krytycznych, takich jak (ale bez ograniczenia):

- **kontrola spoin w przemyśle naftowym i gazowym oraz w energetyce i lotnictwie:**
  - rurociągi transportowe
  - złożone konstrukcje (odcinki rurociągu)
  - rury kotłowe
  - przewody paliwowe
  - rury ciśnieniowe
  - zbiorniki ciśnieniowe i magazynowe
- **kontrola spoin w okrętownictwie**

## DXR140P-HE

### Duży system obrazowania o wysokim kontraście do radiografii o wysokiej energii

DXR140P-HE jest idealnym przenośnym detektorem przeznaczonym do zastosowań o wysokiej energii (izotopowych). Optymalne wewnętrzne ekranowanie zapobiega promieniowaniu rozproszonemu o niskiej energii, ujemnie wpływającemu na jakość obrazu i żywotność elektroniki.



Detektor DXR140P-HE może być stosowany z izotopami i promieniowaniem RTG o wysokiej energii (powyżej 450 kV), jest odpowiedni do ogólnych zastosowań radiograficznych, takich jak (ale bez ograniczenia):

- **kontrola eksploatacyjna w przemyśle naftowym i gazowym oraz w energetyce:**
  - badanie korozji pod izolacją
  - pozycjonowanie zaworów
  - pomiar grubości ścianki
  - badanie podpór rurociągów
  - rury kotłowe
- **kontrola odlewów**
- **konserwacja, naprawa i przeglądy w lotnictwie**
- **przemysł zbrojeniowy i bezpieczeństwo**
- **kontrola konstrukcji:**
  - beton, mosty, podpory, ...
- **nauka, sztuka i archeologia**
- **kontrola linii energetycznych, kontrola GIS**



Badania Nieniszczące i Diagnostyka  
Agenda Wydawnicza SIMP  
ul. Sabaly 11a, 71-341 Szczecin  
e-mail: wydawnictwo@ptbnid.pl  
www.bnid.pl

## ZESPÓŁ REDAKCYJNY / EDITORIAL BOARD

REDAKTOR NACZELNY / EDITOR-IN-CHIEF  
Tomasz Chady

Z-CY REDAKTORA NACZELNEGO / DEPUTES EDITOR-IN-CHIEF  
Adam Sajek  
Ryszard Pakos

CZŁONKOWIE REDAKCJI / MEMBERS OF THE BOARD  
Jacek Grochowalski  
Ryszard Łukaszk

## REDAKTORZY DZIAŁOWI / SECTION EDITORS

METODOLOGIA BADAŃ / RESEARCH METHODOLOGY  
Sławomir Mackiewicz, Marek Śliwowski

CERTYFIKACJA W BADANIACH / CERTIFICATION IN RESEARCH  
Bogdan Piekarczyk

URZĄDZENIA I SYSTEMY BADAŃ  
/ EQUIPMENT AND SYSTEMS FOR RESEARCH  
Grzegorz Jezierski, Marek Lipnicki

PRAKTYKA PRZEMYSŁOWA BADAŃ  
/ PRACTICE OF INDUSTRIAL RESEARCH  
Krzysztof Dragan, Darek Wojdała

DIAGNOSTYKA / DIAGNOSTICS  
Bogusław Ładecki,

MIĘDZYNARODOWA RADA PROGRAMOWA  
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE

Prof. Ryszard Sikora, *Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Przewodniczący/President*

Prof. Krishnan Balasubramaniam, *Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India*  
Prof. Alexander Balitskii, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Prof. Gilmar F. Batalha, *University of Sao Paulo, Brasil*

Prof. Leonard J. Bond, *Iowa State University, USA*

Dr Pierre Calmon, *CEA, France*

Prof. Ermanno Cardelli, *Università degli Studi di Perugia, Italy*

Prof. Zhenmao Chen, *Xi'an Jiaotong University, China*

Prof. Leszek A. Dobrzański, *World Academy of Materials and Manufacturing Eng., Polska*

Dr Hubert Drzeniek, *AMIL Werkstofftechnologie GmbH, Germany*

Prof. Antonio Faba, *Università degli Studi di Perugia, Italy*

Prof. Nikolaos Gouskos, *University of Athens, Grece*

Mgr Paweł Grześkowiak, *UDT, Polska*

Prof. Jerzy Hoła, *Politechnika Wroclawska, Polska*

Prof. Jolanta Janczak-Rusch, *Empa, Switzerland*

Mgr Ryszard Jawor, *Ryszard Jawor Usługi NDT, Polska*

Dr Grzegorz Jezierski, *Politechnika Opolska, Polska*

Inż. Sławomir Józwiak, *NDT Systems, Polska*

Mgr Pablo Katchadjian, *National Atomic Energy Commission of Argentina, Argentina*

Mgr Jan Kielczyk, *Energomontaż-Północ, Polska*

Mgr Jacek Kozłowski, *TEST PLB, Polska*

Prof. Marc Kreutzbruck, *University of Stuttgart, Germany*

Dr. Jochen Kurz, *DB Systemtechnik GmbH, Germany*

Mgr Marek Lipnicki, *KOLI, Polska*

Prof. Leonid M. Lobanow, *Paton Welding Institute, Ukraine*

Dr Sławomir Mackiewicz, *NDT SOFT, Polska*

Dr Wojciech Manaj, *Instytut Lotnictwa, Polska*

Dr Tadeusz Morawski, *Usługi Techniczne i Ekonomiczne "Level", Polska*

Prof. Zinovy T. Nazarchuk, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Dr Ryszard Nowicki, *GE Energy, Polska*

Prof. Mohachiro Oka, *Oita National College of Technology, Japan*

Dr Jolanta Radziszewska-Wolińska, *Instytut Kolejnictwa, Polska*

Prof. Helena Maria Geirinhas Ramos, *Instituto Superior Técnico, Portugal*

Prof. Joao M A Rebello, *Federal University of Rio de Janeiro, Brasil*

Prof. Artur Lopes Ribeiro, *Instituto Superior Técnico, Portugal*

Prof. Maria Helena Robert, *University of Campinas, Brasil*

Dr hab. Maciej Roskosz, *Politechnika Śląska, Polska*

Prof. Krzysztof Schabowicz, *Politechnika Wroclawska, Polska*

Prof. Valentin R. Skalsky, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Prof. Jacek Stania, *Łukasiewicz – Górnos Śląski Instytut Technologiczny, Polska*

Prof. Jacek Szelażek, *IPPT PAN, Polska*

Dr Marek Śliwowski, *NDTEST Warszawa, Polska*

Prof. Antonello Tamburrino, *University of Cassino and Southern Lazio, Italia*

Prof. Yuji Tsuchida, *Oita University, Japan*

Prof. Andrzej Tytko, *AGH Kraków, Polska*

Prof. Lalita Udpa, *Michigan State University, USA*

Prof. Gábor Vértesy, *Hungarian Academy of Sciences, Hungary*

Dr Grzegorz Wojas, *UDT, Polska*

Prof. Sławomir Wronka, *Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Polska*

Prof. Chunguang Xu, *Beijing Institute of Technology, China*

Prof. Noritaka Yusa, *Tohoku University, Japan*

# Badania Nieniszczące i Diagnostyka

Nondestructive Testing and Diagnostics

NR 1-4/2023

ISSN 2451-4462 (ONLINE: 2543-7755)

VOLUMEN 8

## SPIS TREŚCI

## Adam Kondej, Dominik Kukla

Nieniszcząca ocena grubości przypowierzchniowej warstwy azotków w technicznych stopach żelaza metodą prądów wirowych\* ..... 12

## Tomasz Katz

Modelowanie wykrywania wad kontaktowozmęczenia w szynach kolejowych metodą ultradźwiękową\* ..... 17

## Piotr Bielawski

Diagnozowanie potencjału eksploatacyjnego zespołu maszyn\* ..... 25

## Tomasz Gorzelańczyk, Krzysztof Schabowicz

Przegląd nowoczesnych metod nieniszczących wykorzystywanych do badania płyt włóknisto-cementowych\* ..... 30

## Alireza Akhlaghi

Porosity measurement in CFRP\* ..... 37

## Jerzy Kaszyński

Problematyka badań nieniszczących w budownictwie na krajowych konferencjach KKBN - przeżyjmy to jeszcze raz ..... 40

## Maciej Martyna, Roman Martyna

Możliwości i ograniczenia magnetycznej metody MRT badania stanu technicznego lin stalowych w czasie ich eksploatacji na urządzeniach dźwignicowych\* ..... 48

## Mateusz Cybulski, Marek Lipnicki, Krzysztof Mroczek, Rafał Obląkowski

Badania ultradźwiękowe Phased Array złączów choinkowych stopki łopaty stopni L-0 po stronie turbiny i generatora w elektrowni jądrowej w Szwecji\* ..... 56

## Bartosz Hyla, Michał Sobczak, Jakub Roemer

Badania nieniszczące materiałów kompozytowych metodą termografii laserowej\* ..... 62

## Mateusz Napiórkowski, Mariusz Szóstak, Krzysztof Schabowicz

Nieniszczące, wizualne metody badań wykorzystujące wirtualną rzeczywistość w budownictwie – stan wiedzy\* ..... 67

## Mateusz Wróbel, Maciej Szwed

Fitness for service dla urządzeń ciśnieniowych – doświadczenia UDT\* ..... 72

## Maciej Szwed, Tomasz Jakubowski, Michał Targoński

Detekcja pęcherzy wodorowych metodami ultradźwiękowymi TOFD, TULA i Phased Array\* ..... 80

## Karol Kaczmarek

Wymagania normy PN-EN ISO 9712 dla egzaminu praktycznego w sektorach przemysłowych\* ..... 88

## Marcin Lewandowski, Jakub Rozbicki, Hanna Smach, Piotr Karwat,

Arkadiusz Szczurek, Jolanta Sala, Alicja Bera

Modelowe rozwiązania skanerów UTPA do badań spawów dla wież wiatrowych, sekcji płaskich oraz konstrukcji wielkogabarytowych on-shore/off-shore\* ..... 97

## Jakub Spytek, Kajetan Dziedzic, Łukasz Ambroziński, Łukasz Pieczonka

Obrazowanie wad w strukturach cienkościennych z wykorzystaniem ultradźwiękowych fal przewodzonych\* ..... 101

Streszczenia artykułów zgłoszonych na 50. KKBN ..... 105

## Bogusław Ładecki, Joanna Augustyn-Nadzieja

Problemy pęknięcia zmęczeniowego wału wirnika wentylatora ze stali C45\* ..... 120

Informacje BNID - Wspomnienie o plk. dr. inż. Romanie OSTROWSKIM ..... 124

Informacje dla Autorów i Czytelników ..... 125

\* Artykuł recenzowany

PATRONAT I STAŁA WSPÓŁPRACA  
PATRONAGE AND PERMANENT COOPERATION



PTBNiDT

Mateusz Wróbel, Maciej Szwed

Urząd Dozoru Technicznego, Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego

# Fitness for service dla urządzeń ciśnieniowych – doświadczenia UDT

## Fitness For Service engineering assessment for pressure equipment - experience of the Office of Technical Inspection

### STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono możliwości zastosowania wirtualnej rzeczywistości i innowacyjnych technologii (m.in. zastosowanie bezałogowych statków powietrznych, skaningu laserowego) do nieniszczących, wizualnych badań w budownictwie. Zastosowanie wirtualnej rzeczywistości umożliwia przeprowadzenie zdalnej i bezpiecznej inspekcji budowlanej, bez konieczności „fizycznego” wejścia i przebywania na niepewnej konstrukcji lub w obiekcie budowlanym, będącym w złym stanie technicznym. Wizualne badania stanu technicznego, uszkodzeń, można wykonać w wirtualnym świecie, za pomocą gogli VR. Wirtualna rzeczywistość to technologia, która pozwala na stworzenie trójwymiarowego wirtualnego świata, w którym użytkownik ma możliwość swobodnej eksploracji. Środowisko cyfrowe zostaje stworzone w oparciu o dane pozyskane w sposób bezpieczny (zdalny) przy pomocy skanerów laserowych i dronów. Zapewnia to dokładne odwzorowanie obiektu w środowisku cyfrowym oraz zapewnia możliwość wykonania precyzyjnej inspekcji. VR może również stanowić platformę do koordynacji międzybranżowej dla obiektów wymagających planów naprawczych przy braku możliwości wizji lokalnej. W artykule przedstawiono obecny stan wiedzy oraz zaproponowano kolejne kierunki badań.

### 1. Wstęp

Normy dotyczące urządzeń ciśnieniowych zawierają wymagania odnoszące się do etapu wytwarzania. W trakcie eksploatacji urządzeń z uszkodzeniami analiza stanu technicznego obiektu nie jest już tak oczywista. Niektóre ze standardów technicznych (np. API 653 – Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction) opisują jedynie metodę wykonania naprawy lub zmianę parametrów procesowych. Dokument ten nie daje natomiast odpowiedzi na temat akceptowalności danego uszkodzenia oraz pozostałej trwałości eksploatacyjnej.

Uszkodzenia urządzeń ciśnieniowych wynikają w dużej mierze z oddziaływania aktywnych mechanizmów degradacji. Mogą one prowadzić do wystąpienia uszkodzeń tj.:

- pocienienia (ogólne, miejscowe oraz pitting),
- pęknięcia powierzchniowe i podpowierzchniowe,
- mikropęknięcia i mikropory,
- zmiany struktury materiału,
- zmiany geometrii.

Dostępne publikacje naukowe, które opisują tego typu zagadnienia, są często pozbawione inżynierskiego podejścia, co znacząco ogranicza możliwość ich wykorzystania w praktyce inspekcyjnej. Ocena zidentyfikowanych uszkodzeń oraz ustalenie bezpiecznego okresu i warunków dalszej eksploatacji stanowi zatem wyzwanie.

W takich przypadkach rozwiązaniem może być

wykorzystanie standardu technicznego – opracowanego wspólnie przez Amerykański Instytut Naftowy (American Petroleum Institute – API) i Amerykańskie Stowarzyszenie Inżynierów Mechaników (American Society of Mechanical Engineers – AMSE) – API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service. Dokument ten jest zbiorem procedur pozwalających na ocenę urządzeń ciśnieniowych z wykrytymi uszkodzeniami oraz szacowanie ich pozostałej trwałości eksploatacyjnej. API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service zawiera ponadto szereg przydatnych wskazówek związanych z wykonywaniem badań NDT, zapobieganiem ponownym uszkodzeniom czy też dotyczących sposobu monitorowania urządzeń w trakcie dalszej eksploatacji. Metodologia Fitness For Service została opracowana z myślą o urządzeniach instalowanych w przemyśle rafineryjnym i petrochemicznym.

### 2. CZEŚĆ I - Wprowadzenie do metodologii fitness for service

#### 2.1 Budowa standardu

Standard API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service został podzielony na 14 części.

W części 1 opisano metodologię Fitness For Service. Wymieniono w niej także najważniejsze obszary zastosowania omawianego dokumentu.

Część 2 stanowi wprowadzenie do procedur Fitness For Service. Opisane zostały w niej poszczególne poziomy oceny, a także związane z nimi kryteria. W zależności od rodzaju

\*Autor korespondencyjny.

E-mail: mariusz.szostak@pwr.edu.pl

uszkodzenia ocenę przeprowadza w oparciu o:

- wartości naprężeń dopuszczalnych,
- współczynnik wytrzymałości resztkowej – RSF,
- diagramy oceny uszkodzeń – FAD.

W załącznikach 2A÷2F API 579-1/ASME FFS-1 można znaleźć szczegółowe informacje dotyczące m.in. obliczeń wytrzymałościowych i wymaganych właściwości materiałowych.

Części 3÷14 zawierają procedury oceny stanu komponentów z konkretnymi rodzajami uszkodzeń. Zestawienie typów uszkodzeń ujętych w metodologii Fitness For Service przedstawiono na Rysunku 1.

Każda z części 3÷14 charakteryzuje się usystematyzowaną i jednolitą budową. Wyróżnić można w nich rozdziały opisujące kolejno:

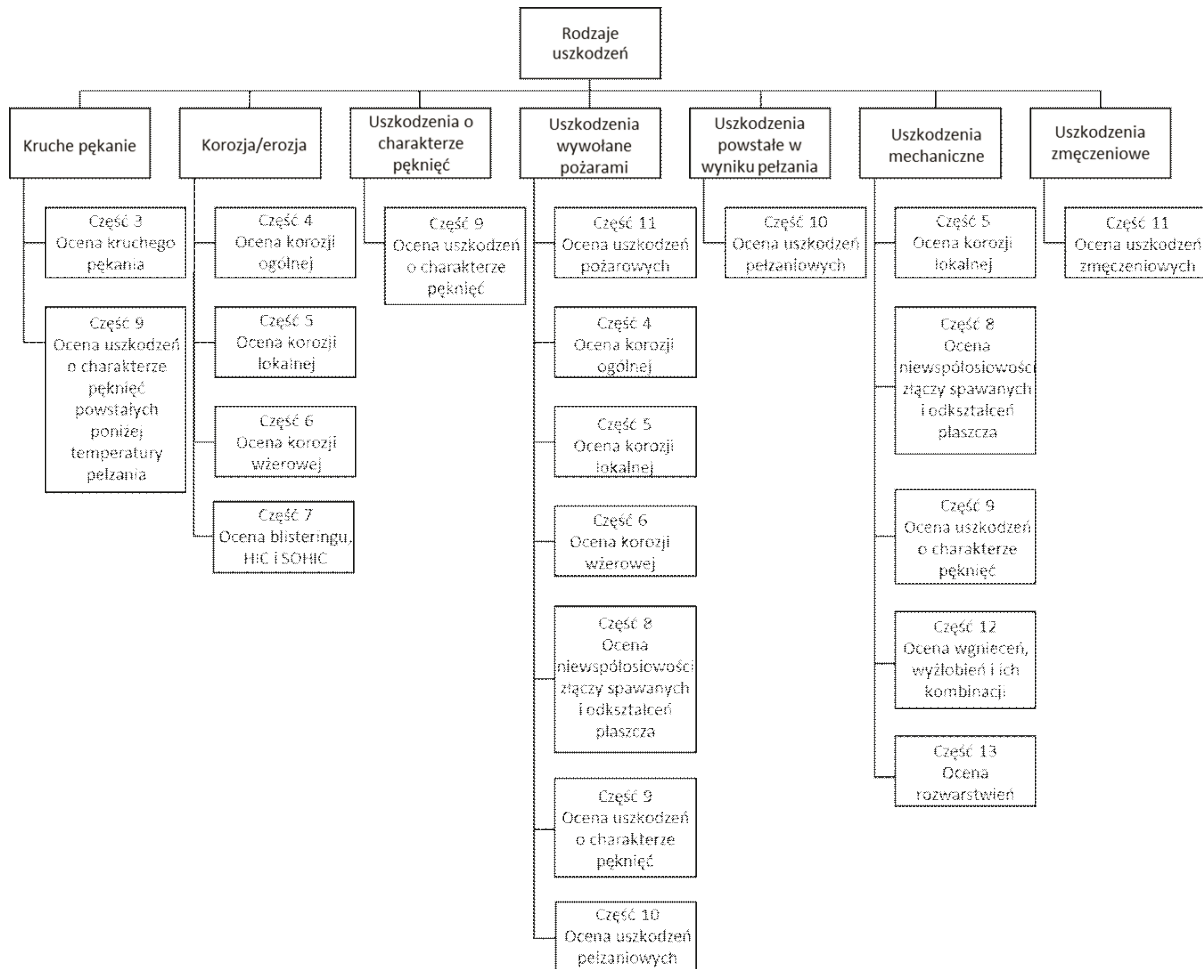
- identyfikację uszkodzenia wywołanego danym mechanizmem degradacji,
- stosowność i ograniczenia dla poszczególnych procedur oceny,
- dane, które są wymagane do przeprowadzenia oceny,
- techniki oceny i kryteria akceptacji,
- sposób oceny pozostałej trwałości eksploatacyjnej,
- środki zaradcze przed powstaniem danego uszkodzenia,
- zalecenia dotyczące sposobu monitorowania urządzenia,
- wymagania dotyczące dokumentowania procesu oceny.

Poszczególne procedury oceny są ze sobą ściśle powiązane. Nieznajomość jednej z części może skutkować brakiem możliwości przeprowadzenia oceny dla innego typu uszkodzenia.

## 2.2 Zespół wykonujący ocenę fitness for service

Wykonanie oceny Fitness For Service wymaga stworzenia interdyscyplinarnego zespołu osób, które powinny posiadać kompetencje z zakresu m.in. inżynierii materiałowej, metalurgii, korozji, budowy urządzeń ciśnieniowych, wytrzymałości konstrukcji, mechaniki pęknięcia, badań nieniszczących czy inżynierii procesowej.

Przeprowadzenie rzetelnej oceny zależy od ścisłej współpracy pomiędzy inspektorami UDT i służbami odpowiedzialnymi za eksploatację analizowanego urządzenia. Fitness For Service wykorzystuje wyniki przeprowadzonych inspekcji, które wraz z danymi konstrukcyjnymi analizowanego urządzenia stanowią podstawę do przeprowadzenia oceny. Wiarygodność i dokładność przeprowadzonych badań jest kluczowa dla poprawności uzyskanych wyników. Istotną rolę odgrywa zatem komunikacja pomiędzy zespołem prowadzącym ocenę Fitness For Service a personelem wykonującym badania NDT, który powinien otrzymać informację o celu przeprowadzenia badań oraz o oczekiwanym typie



Rys. 1. Rodzaje uszkodzeń ocenianych według metodologii Fitness For Service [na podstawie Figure 2.1 API 579-1/ASME FFS-1].

uszkodzeń. Ważny aspekt stanowi również dobór odpowiednich metod badawczych, tak aby możliwe było precyzyjne zwymiarowanie uszkodzenia i dokładne określenie jego lokalizacji w danej konstrukcji. Rekomendowane jest również ustalenie oczekiwań związanych z wynikami badań przed ich przeprowadzeniem, np. dobór odpowiedniej siatki pomiarowej podczas pomiarów grubości.

### 2.3 Poziomy oceny fitness for service

Metodologia Fitness For Service przewiduje przeprowadzenie oceny stanu urządzenia na trzech poziomach.

- Ocena na poziomie 1 – Procedury oceny dają najbardziej zachowawcze wyniki. Stosowane algorytmy obliczeniowe pozwalają na stosunkowo szybką ocenę przy dostarczeniu jedynie podstawowych informacji o danym urządzeniu.
- Ocena na poziomie 2 – Ocena związana jest z bardziej szczegółową analizą. Wymagane jest dostarczenie większej ilości danych, a poszczególne obliczenia i zależności algebraiczne są bardziej skomplikowane. Otrzymane wyniki cechuje jednak większa precyzja od tych, które uzyskano podczas oceny na poziomie 1.
- Ocena na poziomie 3 – Do przeprowadzenia oceny wymagane jest zazwyczaj wykonanie inspekcji w bardzo szerokim zakresie i pozyskanie dogłębnych

informacji dotyczących urządzenia. Analiza zwykle opiera się na metodach numerycznych, np. metodzie elementów skończonych.

Omawiając metodologię Fitness For Service, warto podkreślić, że niespełnienie wymagań oceny np. na poziomie 1 nie oznacza, że urządzenie powinno zostać wyłączone z eksploatacji. Możliwe jest wykonanie dodatkowej analizy na wyższym poziomie oceny (2 lub 3), której wynik może okazać się pozytywny. W przypadku otrzymania negatywnych rezultatów podczas oceny na każdym z poziomów należy rozważyć wyłączenie urządzenia z eksploatacji, przeprowadzenie naprawy lub zmianę dotychczasowych warunków pracy. Powiązania pomiędzy poszczególnymi poziomami oceny przedstawiono na Rysunku 2.

### 2.4 Stosowalność i ograniczenia

Bardzo ważnym aspektem przy wykorzystaniu metodologii Fitness For Service jest znajomość zakresu stosowalności i ograniczeń dotyczących poszczególnych procedur oceny. Przykładem są tu wymagania dla różnych typów obiektów. W zależności od ocenianego elementu (rodzaju urządzenia, jego geometrii, warunków pracy) możliwe jest przeprowadzenie oceny na danym poziomie. Zestawienie opisujące możliwe do zastosowania poziomy oceny dla konkretnego typu obiektów zestawiono w Tablicy 1.



Rys. 2. Zależność pomiędzy poziomami oceny Fitness For Service.

Tab. I. Typy obiektów i stosowane dla nich poziomy oceny.

OBIEKTY TYPU A  OCENA NA POZIOMIE 1, 2 LUB 3	TYPY OBIEKTÓW		OBIEKTY TYPU C  OCENA NA POZIOMIE 3
	OBIEKTY TYPU B		
	OCENA NA POZIOMIE 2 LUB 3		
	KLASY 1	KLASY 2	
Cylindryczne zbiorniki ciśnieniowe i elementy stożkowe, kuliste zbiorniki ciśnieniowe, dennice, proste odcinki rurociągów, łuki i kolana	Obiekty o takich samych cechach geometrycznych i temperaturowych jak obiekty typu A, dla których obciążenia dodatkowo rzutują na wymaganą grubość ścianki	Króćce zbiorników ciśnieniowych, obszar wzmocnień elementów stożkowych, kołnierze, połączenia płaszcza z płaskim dnem, połączenia wkładów rurowych.	Połączenia dennic z płaszczem, pierścienie wzmocniające, podpory i spódnice, połączenia płaszcza z dnem zbiorników magazynowych

## 2.5 Dokumentowanie wykrytych uszkodzeń I dane wymagane do przeprowadzenia oceny

Dokumentowanie wykrytych uszkodzeń to kolejny istotny element metodologii Fitness For Service. Sposób opisu uszkodzeń oraz wiarygodność pozyskanych danych pomiarowych rzutuje w kolejnym etapie na poprawność wykonanej oceny.

Metodologia Fitness For Service wymaga dostępu do szeregu danych dotyczących danego urządzenia, tj.:

- dokumentacja projektowa i obliczenia wytrzymałościowe,
- raporty z badań przeprowadzonych na etapie wytwarzania,
- dokumenty kontroli,
- informacje na temat warunków pracy urządzenia i stosowanych urządzeń zabezpieczających,
- wyniki prób ciśnieniowych,
- informacje na temat dotychczasowej historii eksploatacji,
- informacje na temat zmian dotyczących ciśnienia i temperatury prowadzonego procesu, medium roboczego, szybkości korozji itp.,
- wyniki okresowych badań NDT,
- informacje na temat przeprowadzonych napraw i/lub modernizacji.

Bez dostępu do powyższych danych praktycznie niemożliwe staje się wykonanie oceny zgodnie z wymaganiami opisanymi w dokumencie API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service.

## 3. CZĘŚĆ II – przykłady analiz fitness for service zrealizowanych przez UDT

### PRZYKŁAD 1 – korozja lokalna kolana rurociągu

#### Opis problemu

Podczas okresowych pomiarów grubości na zewnętrznej tworzącej kolana rurociągu wykryto pocienienie. Pozostała grubość materiału była mniejsza od wymaganej grubości minimalnej wynoszącej 4,63 mm. Dane dotyczące rurociągu zestawiono w Tabelicy 2.

Tab. 2. Dane dotyczące rurociągu

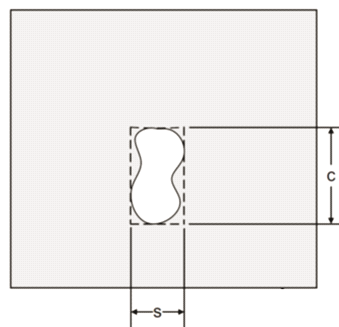
Materiał kolana	ASTM A234 Grade WPB
Parametry obliczeniowe:	
Ciśnienie, P	0,78 MPa
Temperatura, T	240 °C
Średnica zewnętrzna rurociągu, $D_o$	168,3 mm
Grubość nominalna, $t_{nom}$	7,11 mm
Naprężenia dopuszczalne, $S_a$	133,04 MPa
Medium robocze	Amina bogata

Początkowo pomiary wykonano jedynie w 5 punktach pomiarowych zlokalizowanych na zewnętrznej tworzącej kolana. Zastosowana siatka pomiarowa nie pozwoliła na przeprowadzenie analizy Fitness For Service. Z uwagi na zbyt mały zakres badań niemożliwe było dokładne oszacowanie wymiarów powstałego pocienienia definiowanego przez:

- minimalną zmierzoną grubość,
- zasięg (szerokość) zlokalizowanego pocienienia w kierunku obwodowym,
- zasięg (długość) zlokalizowanego pocienienia w kierunku wzdłużnym.

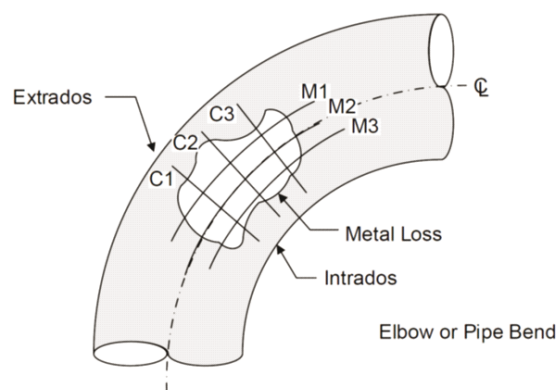
#### Dobór siatki pomiarowej

API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service zawiera szereg wytycznych dotyczących wymiarowania ubytków korozyjnych. W przypadku ubytków o charakterze lokalnym należy oszacować rozmiary wykrytego pocienienia (wymiary s i c) – patrz Rysunek 4.



Rys. 4. Wymiarowanie pocienienia wg API 579-1/ASME FFS-1, Figure 4.11.

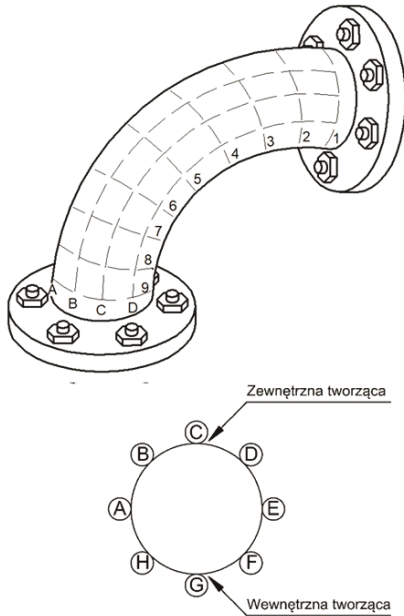
Przykład siatki pomiarowej stosowanej dla kolan rurociągów przedstawiono na Rysunku 5.



Rys. 5. Schemat siatki pomiarowej stosowanej do oceny kolan i łuków wg API 579-1/ASME FFS-1, Figure 4.

Stosowana siatka pomiarowa powinna być możliwie gęsta. W dokumencie API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service zawarto równania pozwalające na wyznaczenie rekomendowanej odległości między punktami pomiarowymi ( $L_s$ ). Wartość ta uwarunkowana jest m.in. przez średnicę wewnętrzną urządzenia i grubość  $t_{rd}$ .

Na podstawie zaleceń zawartych w dokumencie API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service zaprojektowano siatkę pomiarową dla analizowanego komponentu – patrz Rysunek 6. Zwiększona (w stosunku do pierwotnej) liczba punktów pomiarowych pozwoliła na dokładniejsze zwymiarowanie powstałego pocienienia.



Rys. 6. Schemat siatki pomiarowej zastosowanej podczas powtórzonych pomiarów.

### Analiza danych pomiarowych

Wyniki otrzymanych pomiarów zestawiono w Tabelicy 3.

Tab. 3. Wyniki pomiarów grubości na zagęszczonej siatce pomiarowej.

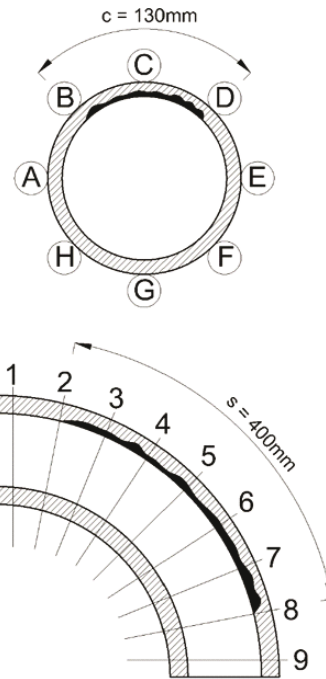
Punkt pomiarowy	A	B	C	D	E	F	G	H	Wzdłużny CTP
1	6,0	5,6	5,5	5,6	5,8	5,9	6,0	6,1	5,5
2	5,8	4,5	4,5	4,9	5,7	5,8	6,2	6,0	4,5
3	5,9	4,1	3,7	4,5	5,9	5,7	6,1	6,0	3,7
4	6,0	3,8	3,2	3,9	5,8	5,7	6,2	5,8	3,2
5	5,6	3,7	3,0	3,8	5,9	5,9	6,1	5,7	3,0
6	5,8	3,6	3,3	4,0	6,0	5,8	6,0	5,7	3,3
7	5,7	3,8	3,7	4,2	5,6	5,8	6,2	5,9	3,7
8	5,7	4,1	4,0	5,6	5,8	5,9	6,0	6,0	4,0
9	5,9	5,8	5,7	5,8	5,7	5,9	6,1	6,0	5,7
Obwodowy CTP	5,6	3,6	3,0	3,8	5,6	5,7	6,0	5,7	

Granice wykrytego lokalnego pocienienia

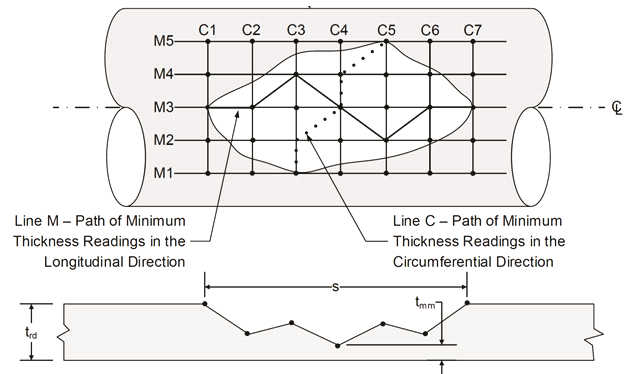
Zarejestrowane zmiany grubości potwierdzają lokalny charakter wykrytego ubytku korozyjnego. Pocienienie zlokalizowane było na zewnętrznej tworzącej kolana. Określono minimalną zmierzoną grubość ( $t_{mm}=3,0$  mm). Oszacowany został także zasięg występowania pocienienia. Wymiar obwodowy,  $c=130$  mm, a wymiar wzdłużny,  $s=400$  mm – patrz Rysunek 7.

Odpowiednio dobrana siatka pomiarowa jest niezbędna do wyznaczenia krytycznych profili grubości (ang. Critical Thickness Profile – CTP). Sposób wyznaczenia CTP przedstawiono na Rysunku 8.

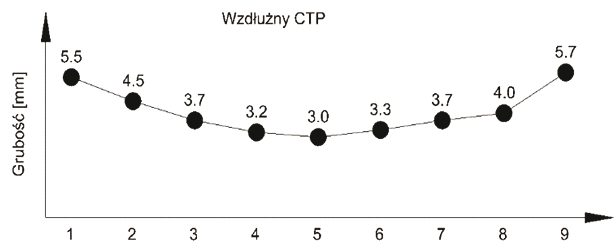
Przykładowy CTP analizowanego kolana rurociągu dla kierunku wzdłużnego przedstawiono na Rysunku 9.



Rys. 7. Schematyczne przedstawienie zasięgu występowania



Rys. 8. Sposób wyznaczenia CTP wg API 579-1/ASME FFS-1, Figure 4.10



Rys. 9. Wzdłużny CTP dla analizowanego kolana rurociągu

W kolejnym etapie oceny krytyczne profile grubości są wykorzystywane do wyznaczenia minimalnych wartości współczynnika RSF. Procedura określenia tego parametru wymaga m.in. podziału krytycznego profilu grubości na podsekcje.



Każdą z podsekcji analizuje się następnie pod kątem wielkości powstałego ubytku. Minimalna wartość RSF (otrzymana dla danej podsekcji) pozwala następnie na określenie MAWP<sub>r</sub>, wg zadanych kryteriów:

$$MAWP_r = MAWP \left( \frac{RSF}{RSF_a} \right)$$

dla  $RSF < RSF_a$

lub  $MAWP_r = MAWP$

dla  $RSF \geq RSF_a$

Ostatnim etapem oceny jest oszacowanie czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji zgodnie z zależnością.

$$R_t \rightarrow \frac{t_{mm} - (C_{rate} \cdot time)}{t_{rd} - (C_{rate}^{rd} \cdot time)}$$

W ocenie ubytków korozyjnych zgodnie z metodologią Fitness For Service kluczowe jest dokładne zwymiarowanie powstałego ubytku korozyjnego. Dokonać można tego poprzez zastosowanie odpowiednio gęstej siatki pomiarowej podczas wykonywania punktowych pomiarów grubości, wykorzystanie technik służących do mapowania korozji (UT C-skan, radiografia cyfrowa) lub pomiary wykonywane w warunkach badania wizualnego, np. podczas oceny wżerów korozyjnych.

Istotne dla przeprowadzenia analizy jest również uzyskanie dodatkowych informacji tj. odległość od najbliższej głównej nieciągłości konstrukcyjnej czy odległość do złączy spawanych znajdujących się w sąsiedztwie wykrytego pocienienia.

Metodologia opisana w dokumencie API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service zawiera także dodatkowe wskazówki dotyczące badań NDT komponentów z wykrytymi uszkodzeniami, np. badania powierzchniowe i objętościowe złączy spawanych znajdujące się w sąsiedztwie ubytków korozyjnych.

### **PRZYKŁAD 2 – reaktor pracujący w warunkach pełzania**

#### **Opis problemu**

Reaktor pracujący w warunkach pełzania przekroczył przyjęty w dokumentacji projektowej czas eksploatacji – 100000 h. Aparat ten pracuje w środowisku zawierającym wodór.

Przeprowadzenie oceny na poziomie 1 i/lub 2 jest możliwe, jeśli dany komponent pracujący w warunkach pełzania nie zawiera dodatkowych uszkodzeń tj. pocienienia i wżery korozyjne, uszkodzenia wywołane obecnością wodoru (blistering, HIC, SOHIC, HTHA), zmiany mikrostrukturalne (grafityzacja, wydzielenia fazy sigma, nawęglenie), czy też pęknięcia. W przypadku wystąpienia jednego lub kilku z wyżej wymienionych uszkodzeń należy zastosować bardziej skomplikowane procedury oceny na poziomie 3 wykorzystujące analizy numeryczne.

**Tab. 4.** Dane dotyczące reaktora

Materiał	ASTM A387 Grade F22 Class 1
Ciśnienie obliczeniowe płaszcza, P	3,8 MPa
Ciśnienie robocze	3,18/3,05 MPa
Temperatura obliczeniowa, T	540 °C
Temperatura robocza	455/488 °C
Naddatek na korozję/FCA	3/0,75 mm
Średnica zewnętrzna, D <sub>0</sub>	1290 mm
Grubość nominalna, t <sub>nom</sub>	50 mm
Naprężenia dopuszczalne, S <sub>a</sub>	53,89 MPa

#### **Analiza wyników badań nieniszczących**

Ocenę reaktora należy rozpocząć od wykonania badań nieniszczących w celu wykazania braku innych rodzajów uszkodzeń. Zrealizowane badania wizualne, magnetyczno-proszkowe i ultradźwiękowe nie wykazały obecności wskazań nieakceptowalnych. Podczas pomiarów grubości nie stwierdzono obecności ubytków korozyjnych. Badania struktury materiału metodą replik wykazały strukturę ferrytyczno-perlityczną bez pustek pełzaniowych. Twardość materiału była wyższa od 140HB (wartość kryterialna podana w standardzie). Na podstawie analizy wykresu Nelsona stwierdzono, że reaktor nie jest narażony na wystąpienie wysokotemperaturowego ataku wodorowego (HTHA – ang. High Temperature Hydrogen Attack).

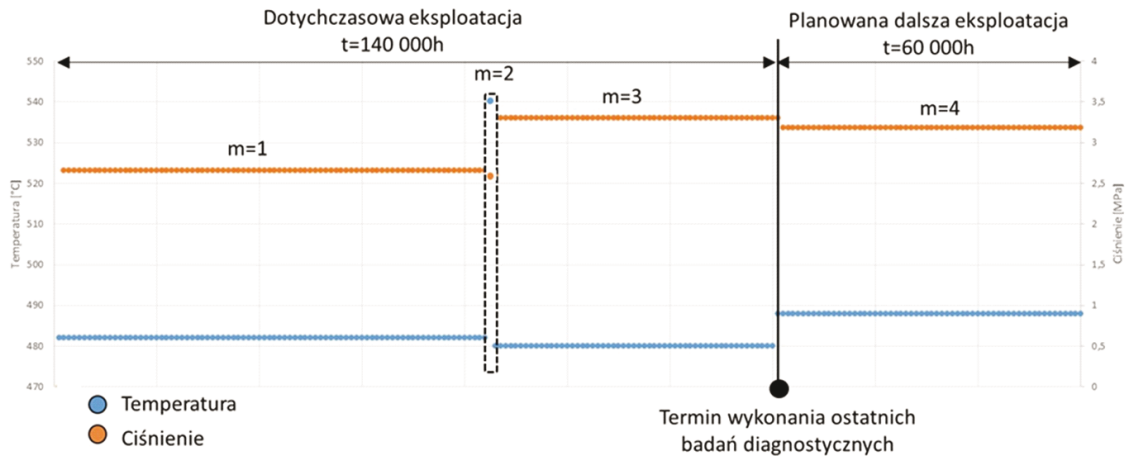
Nie stwierdzono obecności ograniczeń uniemożliwiających przeprowadzenie oceny na poziomie 1 i/lub 2.

#### **Historia eksploatacji**

Przeprowadzając ocenę Fitness For Service konieczna jest analiza historii eksploatacji danego urządzenia. Na podstawie danych otrzymanych od eksploatującego ustalono, że warunki pracy reaktora ulegały wahaniom. Zmiany te są istotne, dlatego konieczne staje się określenie tzw. cykli operacyjnych. W prezentowanym przykładzie wyróżniono 4 cykle operacyjne, przy czym cykl m=4 dotyczy przyszłych planowanych warunków eksploatacji. Dla każdego z cykli operacyjnych konieczne jest obliczenie trwałości podczas pracy w warunkach pełzania, ułamków uszkodzenia i ich następne porównanie z wartością kryterialną. Cykle operacyjne przyjęte do analizy przedstawiono na Rysunku 10. Warunki pracy i czasy trwania każdego z cykli zestawiono w Tabeli 5

**Tab. 5.** Warunki pracy każdego z cykli eksploatacyjnych

Parametry	Cykle operacyjne			
	m=1	m=2	m=3	m=4
Temperatura [°C]	482	540	480	488
Ciśnienie [MPa]	2,66	2,6	3,3	3,18
Czas eksploatacji [h]	84 000	1000	55 000	60 000
	Σ 140 000			



Rys. 10. Cykle operacyjne przyjęte do analizy

### Określenie trwałości pełzaniowej

Określenie trwałości pełzaniowej składa się z kilku etapów, spośród których najważniejsze dotyczą:

- wyznaczenia wartości składowych naprężeń głównych,
- wyznaczenia wartości naprężeń zredukowanych,
- obliczenia trwałości za pomocą jednego z dostępnych modeli, np. za pomocą równań Larsona-Millera.

Równania Larsona-Millera służą do wyznaczenia trwałości

$$LMP(S_{eff}) = \frac{A_0 + A_2 S_{eff}^{0,5} + A_4 S_{eff} + A_6 S_{eff}^{1,5}}{1 + A_1 S_{eff}^{0,5} + A_3 S_{eff} + A_5 S_{eff}^{1,5}}$$

podczas pracy w warunkach pełzania. W celu przeprowadzenia obliczeń konieczna jest konwersja jednostek na naprężenia wyrażone w [ksi] i temperaturę wyrażoną w [°F]. W obliczeniach wykorzystuje się pewne parametry zależne od rodzaju materiału. Zestawienie parametrów Larsona-Millera dla stali z grupy 2.25Cr-1Mo zawarto w Tabelicy 6.

Tab. 6. Parametry Larsona-Millera dla stali 2.25Cr-1Mo

Materiał	Parametry	Minimalny parameter Larsona-Miller – $LMP_m$
2.25Cr-1Mo	$A_0$	$4,3981719 \cdot 10^1$
	$A_1$	$-8,4656117 \cdot 10^{-1}$
	$A_2$	$-4,0483005 \cdot 10^1$
	$A_3$	$2,6236081 \cdot 10^{-1}$
	$A_4$	$1,5373650 \cdot 10^1$
	$A_5$	$4,9673781 \cdot 10^{-2}$
	$A_6$	$6,6049429 \cdot 10^{-1}$
	$C_{LMP}$	20,0

Wartość  $LMP(S_{eff})$  pozwala następnie na wyznaczenie trwałości pełzaniowej dla danego cyklu eksploatacyjnego korzystając z zależności:

$$\log_{10}[L] = \frac{1000 \cdot LMP(S_{eff})}{(T_{refa} + T)} - C_{LMP}$$

Znając trwałość pełzaniową możliwe jest wyznaczenie ułamka uszkodzenia dla danego cyklu operacyjnego:

$$D_c = \sum_{n=1}^N \frac{t}{L}$$

Całkowite uszkodzenie wywołane pracą w warunkach pełzania nie może być większe niż:

$$D_c^{total} = \sum_{m=1}^M D_c \leq D_c^{allow}$$

W omawianym przykładzie  $D_c^{total}$  jest mniejsze od  $D_c^{allow} = 0,8$ . Płaszcz reaktora spełnił kryteria oceny wg API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service – Part 10 – Assessment of components operating in the creep range – Level 2 Assessment – Larson-Miller Parametr. Jego eksploatacja może być kontynuowana przez założony w analizie okres.

### 4. Podsumowanie

Przeprowadzenie analizy Fitness For Service zgodnie z metodologią opisaną w API 579-1/ASME FFS-1 wymaga znajomości wymagań zawartych w tym dokumencie odniesienia. Poszczególne procedury zawierają szczegółowe informacje dotyczące danych koniecznych do przeprowadzenia oceny (sposób charakteryzowania uszkodzeń, dane projektowe), jak i ograniczeń w ich stosowalności. Wykonanie analizy Fitness For Service wymaga stworzenia interdyscyplinarnego zespołu osób, które powinny posiadać kompetencje z zakresu m.in. inżynierii materiałowej, metalurgii, korozji, budowy urządzeń ciśnieniowych, wytrzymałości konstrukcji, mechaniki pękania, badań nieniszczących czy inżynierii procesowej.

### 5. Bibliografia

- [1] API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service, June, 2016
- [2] Materiały własne Urzędu Dozoru Technicznego.

SPIS SKRÓTÓW I OZNACZEŃ

$A_0 \rightarrow A_5$	parametry równania Larsona-Millera <i>Larson-Miller parametr</i>	parametru Larsona-Millera dla n-tego przyrostu czasu
$C_{rate}$	szybkość korozji <i>future corrosion rate</i>	<i>effective stress used to compute the remaining life in terms of the Larson-Miller parameter for the <math>n^{th}</math> time increment</i>
$C_{rate}^{rd}$	szybkość korozji dla materiału z dala od miejscowego ubytku korozyjnego <i>anticipated future corrosion rate away from the local metal loss</i>	$\sigma_e$ naprężenia zredukowane <i>effective stress</i>
$C_{LMP}$	stała Larsona-Millera <i>Larson-Miller constant</i>	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ składowe naprężeń głównych <i>principal stress</i>
$D_c$	uszkodzenie pełzaniowe <i>creep damage</i>	$t_{mm}$ minimalna zmierzona grubość określona w momencie oceny <i>minimum measured thickness determined at the time of the inspection</i>
$D_c^{allow}$	dopuszczalne uszkodzenia pełzaniowe <i>allowable creep damage</i>	jednolita grubość z dala od miejscowego miejsca ubytku metalu, ustalona na podstawie pomiarów grubości w czasie oceny <i>uniform thickness away from the local metal loss location established by thickness measurements at the time of the assessment</i>
$D_c$	uszkodzenia pełzaniowe w n-tym okresie czasu <i>creep damage for the <math>n^{th}</math> time period</i>	$t_{rd}$ całkowite uszkodzenia pełzaniowe, uwzględniające wszystkie cykle pracy <i>total creep damage considering all operating cycles</i>
$D_c^{total}$	całkowite uszkodzenia pełzaniowe, uwzględniające wszystkie cykle pracy <i>total creep damage considering all operating cycles</i>	$T_{refa}$ temperatura odniesienia <i>reference temperature</i>
$FAD$	diagramach oceny uszkodzeń <i>Failure Assessment Diagram</i>	$T$ temperatura <i>temperature</i>
$FCA$	naddatek na korozję mający zastosowanie do obszaru z dala od miejsca ubytku materiału <i>Future Corrosion Allowance applied to the region away from the metal loss</i>	$t$ czas <i>time</i>
$FCA_{ml}$	naddatek na korozję mający zastosowanie do obszaru ubytku materiału <i>Future Corrosion Allowance applied to the region of metal loss</i>	
$L$	trwałość przy danej historii obciążania w n-tym przyroście czasu <i>rupture time for the loading history for the <math>n^{th}</math> time increment</i>	
$LMP(S_{eff})$	parameter Larsona-Millera będący funkcją naprężenia $S_{eff}$ <i>Larson-Miller parameter at stress <math>S_{eff}</math></i>	
$L_s$	zalecana odległość między punktami pomiarowymi <i>recommended spacing of thickness readings</i>	
$m$	aktualny numer cyklu operacyjnego <i>current operating cycle number</i>	
$MAWP$	maksymalne dopuszczalne ciśnienie robocze nieuszkodzonego elementu <i>Maximum Allowable Working Pressure of the undamaged component</i>	
$MAWP_r$	zredukowane maksymalne dopuszczalne ciśnienie robocze dla uszkodzonego elementu <i>reduced maximum allowable working pressure of the damaged component</i>	
$RSF$	obliczony współczynnik wytrzymałości w oparciu o zasięg południkowy LTA <i>computed remaining strength factor based on the meridional extent of the LTA</i>	
$RSF_a$	dopuszczalny współczynnik wytrzymałości <i>allowable remaining strength factor</i>	
$S_{eff}$	naprężenia zredukowane użyte do obliczenia pozostałego okresu trwałości za pomocą	