

Marek Nowak ^{1*}, Mateusz Wróbel ²

¹ Dział Badań Laboratoryjnych w Krakowie, Urząd Dozoru Technicznego

² Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego, Urząd Dozoru Technicznego

Monitorowanie urządzeń technicznych z wykorzystaniem metod badań nieniszczących

Monitoring of technical devices using non-destructive testing methods

STRESZCZENIE

Systemy monitorowania w przemyśle wykorzystuje się przede wszystkim do obserwacji i kontroli parametrów eksploatacyjnych np. temperatury, ciśnienia, szybkości przepływu i składu medium roboczego. Systemy te mogą stanowić jeden z elementów składowych rozproszonych systemów sterowania (DCS – ang. Distributed Control System), które pozwalają na prowadzenie i wizualizację trwających procesów technologicznych. Szczególny przypadek systemów monitorowania stanowią układy, które mają na celu rejestrowanie i przetwarzanie danych wykorzystywanych do oceny stanu technicznego pojedynczego urządzenia, grupy urządzeń lub całej instalacji. Dobrym przykładem tego typu aplikacji jest monitorowanie elementów infrastruktury krytycznej, w których na etapie eksploatacji wykryto istotne uszkodzenia. Często wymiana lub naprawa komponentów zawierających wady jest niemożliwa lub trudna do wykonania z uwagi na czynniki ekonomiczne, logistyczne, a także konieczność zachowania ciągłości trwającego procesu technologicznego. W takim przypadku dane urządzenie należy monitorować w celu rejestracji zmiany wielkości danego uszkodzenia lub wartości działających naprężeń. Rejestracja anomalii w tym zakresie daje możliwość szybszego podjęcia decyzji o zatrzymaniu eksploatacji lub obniżeniu parametrów eksploatacyjnych w celu zapobiegnięcia wystąpieniu awarii. Systemy monitorowania są dobierane indywidualnie w zależności od rodzaju urządzenia, występujących w nim uszkodzeń i warunków pracy. W zależności od przewidywanej dynamiki zmian wskazane jest stosowanie monitoringu ciągłego lub okresowego. W prezentowanym materiale przedstawione zostaną przykładowe systemy monitorowania wykorzystujące takie metody badawcze jak emisja akustyczna, pomiar drgań, pomiar temperatury i inne metody badań nieniszczących.

Słowa kluczowe: monitorowanie urządzeń technicznych, monitoring ciągły, monitoring okresowy, badania nieniszczące.

ABSTRACT

Industrial monitoring systems are primarily used to observe and control operating parameters, such as temperature, pressure, flow rate, and the composition of the working medium. These systems can be components of Distributed Control Systems (DCSs), which enable the management and visualisation of ongoing technological processes. A special case of monitoring systems are systems designed to record and process data used to assess the technical condition of a single device, a group of devices, or an entire installation. A good example of this type of application is the monitoring of critical infrastructure components in which significant damage has been detected during operation. Replacing or repairing defective components is often impossible or difficult due to economic and logistical factors, as well as the need to maintain the continuity of the ongoing technological process. In such cases, a given device should be monitored to record changes in the extent of the damage or the values of the applied stresses. Recording anomalies in this area allows for faster decision-making regarding stop of the operation or reducing its operating parameters to prevent a failure. Monitoring systems are individually selected depending on the type of device, its damage, and operating conditions. Depending on the anticipated dynamics of change, continuous or periodic monitoring is recommended. This material will present examples of monitoring systems with research methods such as acoustic emission, vibration measurement, temperature measurement, and other non-destructive testing methods.

Keywords: monitoring of technical devices, continuous monitoring, periodic monitoring, non-destructive testing evaluation.

1. Systemy monitorowania i ich znaczenie w praktyce przemysłowej

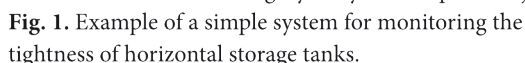
Zgodnie z definicją zawartą w słowniku języka polskiego, monitorowanie to „stała obserwacja i kontrola jakichś procesów lub zjawisk”. Różne systemy monitorowania są wykorzystywane powszechnie w wielu urządzeniach i instalacjach przemysłowych. Istnieją wymagania prawne, które nakazują, aby określone rodzaje urządzeń były wyposażone w systemy monitorowania. Jako przykład mogą posłużyć zapisy zawarte w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 18 września 2001 r. w sprawie warunków

technicznych dozoru technicznego, jakim powinny odpowiadać zbiorniki bezciśnieniowe i niskociśnieniowe przeznaczone do magazynowania materiałów ciekłych zapalnych (Dz.U. 2001 nr 113 poz. 1211) [1]. W § 10 ust. 1 i ust. 2 wskazano na konieczność wyposażenia zbiorników magazynowych „w urządzenie sygnalizujące powstanie wycieku”. Urządzeniami tymi mogą być „system monitorowania przestrzeni międzydennej w zbiornikach naziemnych o osi pionowej” i „system monitorowania przestrzeni międzyściennej w zbiornikach podziemnych i naziemnych o osi poziomej”. Schemat tego typu systemu przedstawiono na Rys. 1.

W przemyśle stosowane systemy monitorowania służą głównie do kontroli parametrów eksploatacyjnych takich jak

*Autor korespondencyjny.

E-mail: marek.nowak@udt.gov.pl

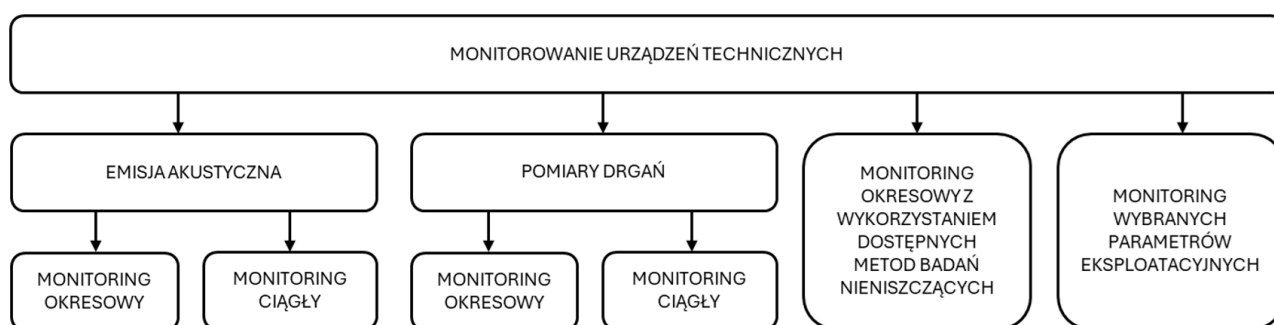


temperatura, ciśnienie, szybkość przepływu i skład medium roboczego. Systemy te stanowią jeden z elementów składowych rozproszonych systemów sterowania (DCS – ang. Distributed Control System), które pozwalają na sterowanie i wizualizację procesów. Przykładowy panel kontrolny DCS prezentujący informacje dotyczące monitorowanych wskaźników przedstawiono na Rys. 2.

- charakter uszkodzenia: uszkodzenie może nie wykazywać tendencji do dalszego rozwoju (uszkodzenia nieaktywne) lub też posiadać skłonność do zwiększania swoich rozmiarów (uszkodzenia aktywne);
- wielkość uszkodzenia: do katastroficznego uszkodzenia danego materiału dochodzi w przypadku osiągnięcia określonego wymiaru (wielkości) uszkodzenia;
- charakter działających naprężeń: nagły wzrost naprężeń i/lub oddziaływanie dodatkowych obciążeń mogą prowadzić do utraty integralności danej konstrukcji.

Zagadnienia związane z oceną uszkodzeń wykrytych podczas eksploatacji stanowią obszar zainteresowania inżynierów na całym świecie.





Rys. 3. Rodzaje systemów monitorowania.

Fig. 3. Types of monitoring systems.

Tematyka ta została szczegółowo opisana w takich dokumentach jak:

- API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service;
- BS 7910 Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures.

Jednym z zaleceń zawartych w wyżej wymienionych dokumentach jest konieczność monitorowania wielkości wykrytych uszkodzeń. Dzięki dostępnym systemom monitorowania możliwe stają się:

- rejestracja zmian wynikających ze zmiany wielkości danego uszkodzenia;
- rejestracja zmian wynikających ze zmiany wartości działających naprężeń;
- szybsze podejmowanie decyzji o wyłączeniu danego urządzenia z eksploatacji lub obniżenie jego parametrów eksploatacyjnych w celu zapobiegnięcia wystąpienia awarii.

Inny przykład aplikacji systemów monitorowania dotyczy diagnostyki drganiowej. Układy wyposażone w elementy wirujące, np. pompy, czy też rurociągi są narażone na działanie zbyt dużych vibracji. Błędnie wykonany projekt instalacji, czy też niewłaściwe wykonanie podpór oraz zawiesznień mogą prowadzić do zbyt dużych drgań, a w konsekwencji do przedwczesnego uszkodzenia wybranych komponentów. Dzięki dostępnym systemom monitorowania możliwa jest długookresowa analiza vibracji, która pozwala na wskazanie newralgicznych obszarów, które mogą wymagać wymiany, naprawy lub przebudowy. Możliwe są również doraźne, cykliczne pomiary drgań umożliwiające monitorowanie stanu zużycia niektórych elementów konstrukcyjnych w dłuższych czasookresach kontroli.

Istotną zaletą systemów monitorowania urządzeń technicznych jest możliwość analizy wyników online. Dzięki ustawieniu odpowiednich kryteriów, możliwe jest generowanie alertów sygnalizujących np. wystąpienie zbyt wysokich wartości określonej danej pomiarowej. Co istotne, dane pomiarowe rejestrowane za pomocą czujników zainstalowanych bezpośrednio na obiekcie są zbierane, przesyłane i rejestrowane na wewnętrznym i zabezpieczonym serwerze. Takie rozwiązanie jest istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa gromadzonych informacji.

3. Różne rodzaje systemów monitorowania

W prezentowanym artykule scharakteryzowano kilka systemów monitorowania. Podział prezentowanych rozwiązań przedstawiono na Rys. 3.

Dobór konkretnego systemu monitorowania lub ich kombinacji wymaga indywidualnego podejścia i szczegółowej charakterystyki danego obiektu. W zależności od możliwej dynamiki zmian możliwe jest stosowanie monitoringu ciągłego lub monitoringu okresowego.

Monitoring ciągły

Monitoring ciągły definiuje się jako długotrwały, liczony w miesiącach lub nawet latach, pomiar i rejestrację określonych parametrów. Ten rodzaj monitoringu jest wskazany do stosowania w najbardziej newralgicznych przypadkach, w których nagła zmiana jakiegoś czynnika może prowadzić do wystąpienia awarii.

Monitoring okresowy

Monitoring okresowy to z kolei zwiększona częstość wykonywania określonych badań i pomiarów. Standardowe badania diagnostyczne przeprowadza się zazwyczaj w okresie postojów remontowych lub podczas badań technicznych (tzw. inspekcji), które są realizowane, np. co kilka lat. Istnieją sytuacje, w których wskazane jest przeprowadzanie dodatkowych kontroli co kilka tygodni lub kilka miesięcy.

3.1 Monitorowanie z wykorzystaniem metody emisji akustycznej (AE)

Emisja akustyczna to metoda badawcza, która często znajduje zastosowanie do monitorowania stanu technicznego konstrukcji. Rozwój uszkodzeń i związane z nimi zjawiska, np. generacja, a następnie propagacja fal sprężystych, mogą być wykrywane przez czujniki piezoelektryczne. Istotną zaletą badań metodą emisji akustycznej jest fakt, iż czujniki rejestrują zdarzenia mające swoje źródło nie tylko w strefie montażu czujnika, ale i poza nią. Dzięki wykorzystaniu odpowiedniej liczby czujników możliwa jest dokładna lokalizacja miejsca generowania tych fal (miejsca uszkodzenia/nieciągłości).

System do monitorowania z wykorzystaniem metody emisji akustycznej składa się z czujników AE, autonomicznego systemu pomiarowego wraz z komputerem przemysłowym, modułu do przesyłu danych oraz pozostałych



Rys. 4. Rodzaje systemów monitorowania.

Fig. 4. Types of monitoring systems.



Rys. 5. Przykładowa wizualizacja danych pomiarowych z badań monitorujących.

Fig. 5. Example visualization of measurement data.

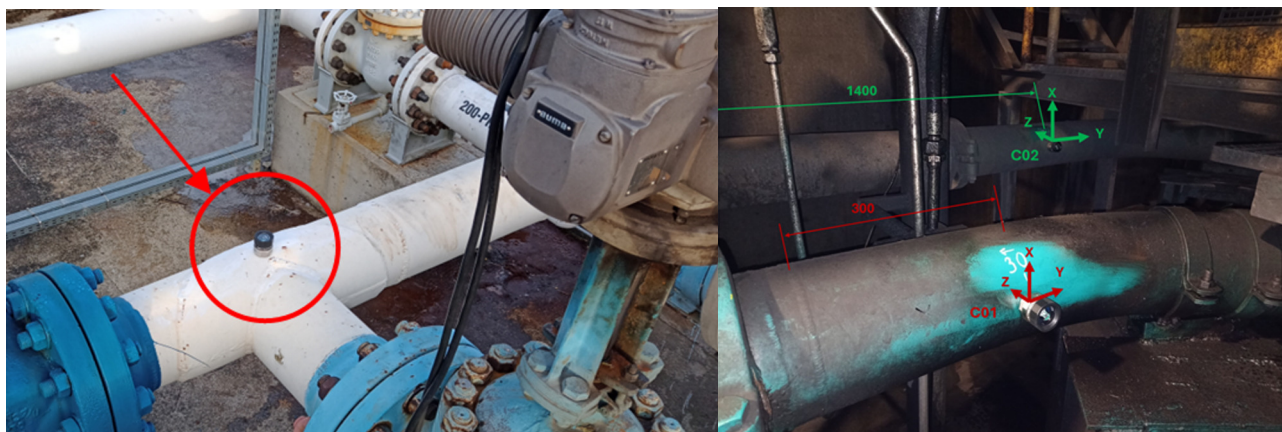
elementów tj. przewody łączące, uchwyty montażowe, itp. Dostępne wyposażenie pozwala na prowadzenie pomiarów również w warunkach podwyższonej temperatury, a także w strefach zagrożenia wybuchem (dyrektywa ATEX). Układ pomiarowy może być dodatkowo wyposażony w mobilną stację pogodową, która pozwala na skorelowanie sygnałów emisji akustycznej z ewentualnymi zjawiskami pogodowymi [2]. Przykład elementów systemu monitorowania wykorzystującego metodę emisji akustycznej przedstawiono na Rys. 4.

Podczas realizacji pomiarów przy monitoringu okresowym dane pomiarowe mogą być analizowane przez personel bezpośrednio w trakcie prowadzenia badania. Ciągłe badanie

monitorujące wymaga użycia specjalistycznego oprogramowania, które pozwala na autonomiczne działanie systemu oraz przesył danych i ich późniejszą wizualizację przez dedykowane ku temu osoby. Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono na Rys. 5.

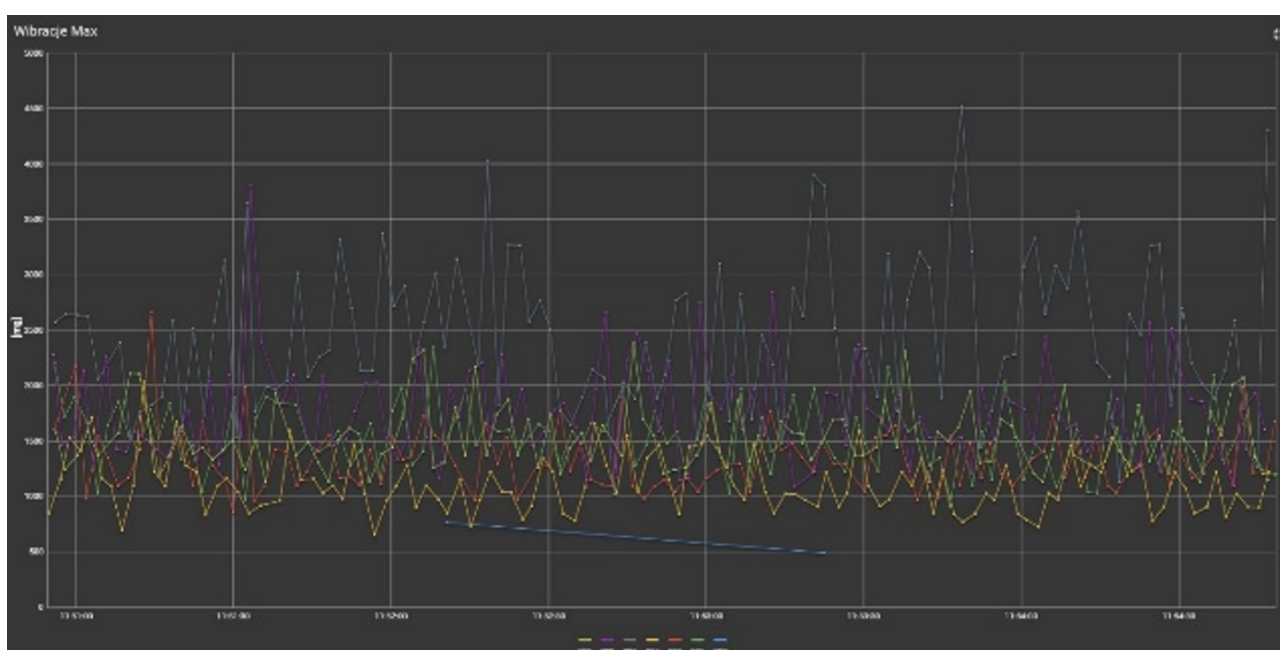
Monitorowanie z wykorzystaniem metody emisji akustycznej znajduje zastosowanie w następujących grupach urządzeń:

- zbiorniki magazynowe o osi pionowej (dno i płaszcze zbiorników),
- urządzenia ciśnieniowe (zbiorniki, reaktory, kolumny, rurociągi technologiczne itp.),
- inne konstrukcje np. mosty stalowe, zasuwki i zawory.



Rys. 6. Czujniki drgań zainstalowane na rurociągach.

Fig. 6. Vibration sensors installed on the pipelines.



Rys. 7. Wartości maksymalnych amplitud drgań zarejestrowane za pomocą serii czujników.

Fig. 7. The values of the maximum vibration amplitudes recorded by a series of sensors.

3.2 Pomiary drgań

Mówiąc o pomiarze drgań warto podkreślić, że pomiarom poddawane są drgania mechaniczne. Tak jak wspomniano wcześniej, działanie zbyt dużych drgań może oddziaływać niekorzystnie na urządzenia wirujące, obiekty znajdujące się w ich sąsiedztwie, czy też rurociągi. Monitoring drgań realizowany jest za pomocą specjalnych czujników do pomiaru drgań lub szybkoklatkowej kamery wzmacniającej ruch i drgania.

Bezprzewodowe czujniki do pomiaru drgań

W przypadku wykorzystania bezprzewodowych czujników drgań, możliwe są pomiary w strefach zagrożonych wybuchem w zakresie temperatur od -55°C do 80°C . Monitoring może mieć charakter monitoringu ciągłego oraz okresowego. Dzięki pomiarom możliwe jest wskazanie newralgicznych elementów konstrukcji, które poddawane

są działaniu drgań o najwyższej amplitudzie [3]. Przykładowy czujnik drgań zamontowany na rurociągu i wyniki pomiarów przedstawiono na Rys. 6 i Rys. 7.

Szybkoklatkowa kamera wzmacniająca drgania

Szybkoklatkowa kamera to narzędzie wykorzystywane do monitoringu okresowego. Urządzenie to pozwala na nagrywanie i wzmacnianie ruchu, który nie jest widoczny gołym okiem. Każdy piksel na zarejestrowanym kamerą obrazie może pełnić rolę czujnika zdolnego do pomiaru drgań. Daje to możliwość mierzenia i kwantyfikowania ruchu dowolnych konstrukcji, które można sfilmować. Wykrywane są przemieszczenia na poziomie od $2,5\ \mu\text{m}$, które są następnie wzmacniane do poziomu rejestrowalnego dla człowieka. Oprogramowanie pozwala następnie na wyizolowanie oraz wyselekcjonowanie indywidualnych częstotliwości w zarejestrowanym i wzmocnionym obrazie ruchu.

Wyniki badań kamerą wzmacniającą drgania pozwalają na:

- pomiar podstawowych parametrów drgań: częstotliwość, prędkość,
- pomiar przemieszczeń maszyn wirujących, rurociągów, itp.,
- identyfikację częstotliwości wpływającej na drgania całych konstrukcji,
- identyfikację źródła vibracji w większym systemie pracujących obok siebie urządzeń oraz przyczyny ich rozprzestrzeniania,
- identyfikację miejsc, które należy zbadać lub monitorować,
- weryfikację prawidłowości mocowania rurociągów czy posadowienia maszyn.

Poglądowe zdjęcie wykonane w trakcie wykonywania pomiarów za pomocą kamery wzmacniającej drgania przedstawiono na Rys. 8.



Rys. 8. Badanie kamerą wzmacniającą ruch/drgania.

Fig. 8. Motion/vibration amplification camera test

3.3 Monitoring okresowy z wykorzystaniem dostępnych metod badań nieniszczących

Zgodnie z przyjętą definicją monitoringu okresowego, wszystkie dostępne metody badań nieniszczących mogą być stosowane jako badania monitorujące. Badania wizualne, badania penetracyjne i badania magnetyczno-proszkowe są przydatne w przypadku oceny uszkodzeń powierzchniowych. Badania ultradźwiękowe i badania radiograficzne wykorzystywane są natomiast do oceny nieciągłości znajdujących się wewnątrz materiału.

Jednym z najczęściej występujących uszkodzeń materiałów są ubytki korozyjne. Jeżeli w danym komponencie rzeczywista grubość materiału jest bliska przekroczenia grubości obliczeniowej i szybkość korozji nie jest znana, to wskazane może być wykonywanie częstszych pomiarów grubości, w celu zapobiegnięcia wystąpieniu zbyt dużego ubytku grubości. Oprócz tradycyjnych punktowych pomiarów grubości, możliwe jest również wykorzystanie specjalnych czujników, które pozwalają na:

- odczyt pomiaru grubości przez personel w dowolnym momencie (rozwiązanie korzystne z uwagi na np. brak konieczności usuwania izolacji)

lub

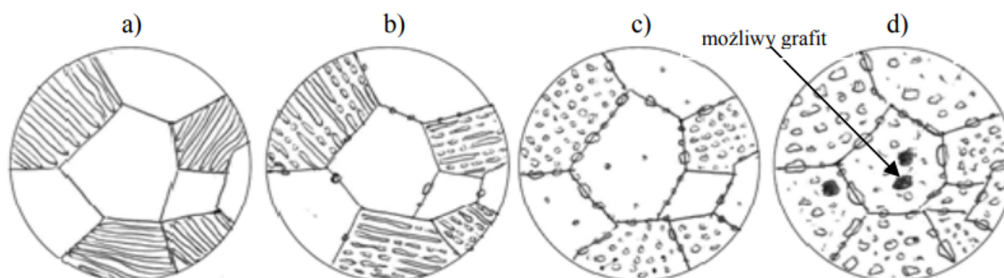
- ciągły automatyczny transfer danych pomiarowych z zadaną częstością pomiaru (rozwiązanie zdecydowanie droższe, rekomendowane do najbardziej problematycznych przypadków).

Warto zaznaczyć, że dostępne metody monitorowania grubości mogą okazać się przydatne jedynie w przypadku wystąpienia korozji o charakterze ogólnym. W przypadku narażenia urządzenia na działanie korozji wżerowej, ten rodzaj pomiarów nie powinien być w ogóle stosowany.

Szczególnym rodzajem okresowych badań monitorujących są badania mikrostruktury metodą replik matrycowanych. Wykonywanie tego typu badań pozwala na śledzenie i analizowanie procesów degradacji zachodzących w materiale. Zmiany mikrostruktury materiału są szczególnie istotne w przypadku urządzeń pracujących w warunkach pełzania [4]. Przykładowy model degradacji mikrostruktury stali ferrytyczno-perlitycznej powstałej w wyniku długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania przedstawiono na Rys. 9.

3.4 Monitorowanie wybranych parametrów eksploatacyjnych

Oprócz danych, które charakteryzują dany materiał lub całe urządzenie istotny jest również dostęp do parametrów procesów charakteryzujących przesyłane lub magazynowane medium. Optymalnie, dane te mogą być dostarczane przez przedstawiciela eksploatującego, np. dane z DCS. Jeżeli z pewnych przyczyn nie jest to możliwe lub wskazane, istnieje możliwość zainstalowania dedykowanych ku temu czujników. Przykładem mogą być bezprzewodowe czujniki do pomiaru



Rys. 9. Model degradacji struktury stali ferrytyczno-perlitycznej w wyniku pełzania (źródło [4]).

Fig. 9. Model of degradation of ferritic-pearlitic steel structure due to creep (źródło [4])

temperatury. Ich montaż odbywa się bezpośrednio na obiekcie. Czujniki spełniają wymagania dyrektywy ATEX a dopuszczalny zakres temperatury ich pracy wynosi od -55°C do 80°C.

4. Podsumowanie i wnioski

Dostępność różnorodnych narzędzi pomiarowych i możliwość przesyłania danych pomiarowych na odległość stwarzają nowe możliwości dla oceny stanu urządzeń technicznych.

Dobór optymalnego systemu monitoringu jest każdorazowo poprzedzany szczegółową analizą urządzenia lub instalacji. Pod uwagę brane są przede wszystkim zjawiska, które mają być monitorowane, ich charakter a także warunki pracy danego urządzenia czy instalacji.

Zastosowanie systemów monitoringu pozwoliło na bezpieczną eksploatację urządzeń z ujawnionymi uszkodzeniami.

Zrealizowane dotychczas systemy monitoringu stanowią podstawę do opracowywaniu coraz to bardziej rozbudowanych systemów i są odpowiedzią na potrzeby partnerów przemysłowych.

5. Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 18 września 2001 r. w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego, jakim powinny odpowiadać zbiorniki bezciśnieniowe i niskociśnieniowe przeznaczone do magazynowania materiałów ciekłych zapalnych (Dz.U. 2001 nr 113 poz. 1211).
- [2] M. Nowak, I. Baran: „System ciągłego monitoringu metodą emisji akustycznej jako przykład zastosowania przez Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego nowych metod badawczych”, materiały wewnętrzne Urzędu Dozoru Technicznego.
- [3] Raport podsumowujący badania z wykorzystaniem bezprzewodowych czujników drgań, materiały wewnętrzne Urzędu Dozoru Technicznego.
- [4] Dobrzański J. „Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki”, Volume 3, 2011.