
**XIV Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 4-7 marca 2008**

**STATYSTYCZNA OCENA USZKODZEŃ KOROZYJNYCH
NA PODSTAWIE BADAŃ ULTRADŹWIĘKOWYCH**

Sławomir Mackiewicz
IPPT PAN Warszawa

1. Wstęp

Korozja jest jedną z najważniejszych przyczyn uszkodzeń, awarii oraz obniżania parametrów eksploatacyjnych konstrukcji i urządzeń stosowanych w różnych dziedzinach współczesnej techniki. Z tego powodu badania nieniszczące uszkodzeń korozyjnych stanowią ważny element oceny stanu technicznego eksploatowanych obiektów i urządzeń. Znajduje to odbicie w coraz większej liczbie technik, metod i systemów badawczych oferowanych do tego celu przez wyspecjalizowane firmy i laboratoria. Oprócz znanych i od dawna stosowanych ultradźwiękowych pomiarów grubości ścianki szeroko wykorzystuje się w tym celu techniki magnetyczne (MFL), techniki impulsowych prądów wirowych (INCOTEST), techniki laserowe, termowizyjne a ostatnio również techniki ultradźwiękowych fal prowadzonych (Guided Waves). Dokładniejszy opis wspomnianych technik znaleźć można w jednym z referatów prezentowanych na Seminarium w uprzednich latach [1].

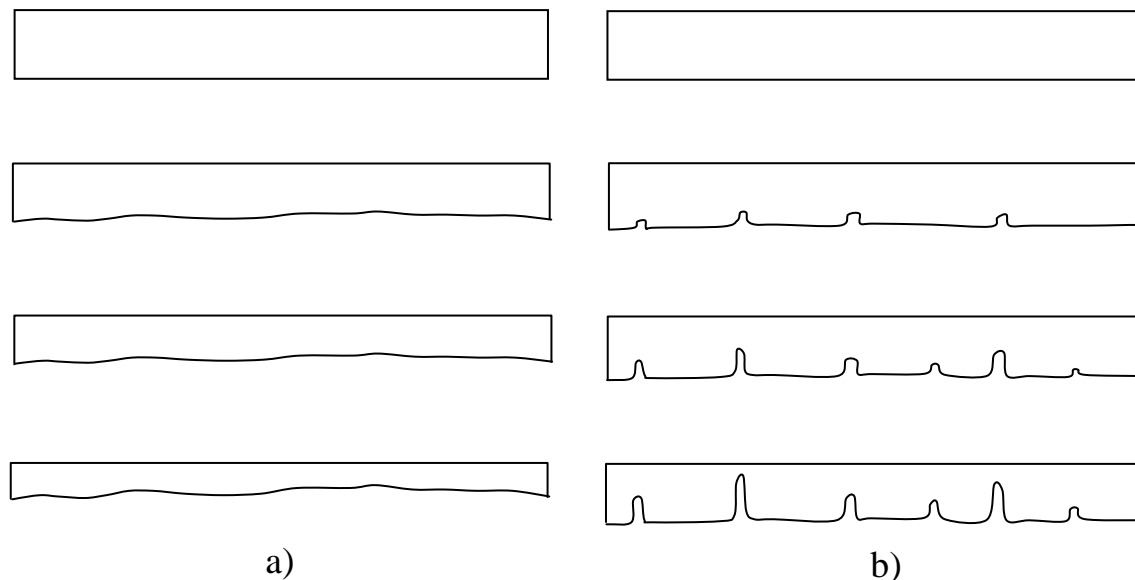
Niniejszy artykuł poświęcony jest metodom badania i oceny uszkodzeń korozyjnych bazującym na pomiarach ultradźwiękowych. Głównym jego celem nie jest jednak omawianie dość powszechnie znanych technik ultradźwiękowych pomiarów grubości lecz skoncentrowanie się na bardziej fundamentalnych zagadnieniach dotyczących właściwego doboru metodyki badań ultradźwiękowych oraz sposobów obróbki i interpretacji ich wyników. Zastosowany sposób badania powinien uwzględniać typ uszkodzeń korozyjnych obiektu, dając wyniki liczbowe jednoznacznie charakteryzujące wielkość tych uszkodzeń oraz przydatne przy ocenie stanu technicznego obiektu.

W tym miejscu warto zauważyć, że w krajowej praktyce przemysłowej ultradźwiękowa ocena ubytków korozyjnych sprowadza się, poza nielicznymi wyjątkami, do punktowych pomiarów grubości ścianki na określonej siatce pomiarowej zaś statystyczna obróbka wyników badań do obliczenia średniej grubości ścianki.

Powyższe podejście jest zdecydowanie zbyt uproszczone i pozostaje daleko w tyle za światową praktyką w tym zakresie [3-6]. Pomiar punktowy stanowi właściwą metodę badania jedynie w odniesieniu do korozji równomiernej lub erozji, gdzie grubość ścianki nie ulega większym zmianom pomiędzy punktami pomiarowymi. W przypadku silnie zlokalizowanej korozji wżerowej, szczelinowej lub naprężeniowej (SCC) metoda pomiarów punktowych nie daje wartościowych rezultatów, co więcej, może prowadzić do poważnego niedoszacowania uszkodzenia korozyjnego. Dzieje się tak dlatego, że średnia grubość ścianki może wykazywać jedynie nieznaczny spadek nawet wówczas gdy pojedyncze wżery są bliskie perforacji ścianki. W niniejszej pracy przedstawiono nowoczesne metody badań ultradźwiękowych korozji zlokalizowanej wykorzystujące metody statystyczne a w szczególności statystyczną teorię wartości ekstremalnych.

2. Badania ultradźwiękowe różnych typów korozji

Z punktu widzenia metodyki badań ultradźwiękowych korozję należy podzielić na korozję równomierną (także erozję) oraz korozję zlokalizowaną. Schemat rozwoju obu typów korozji w materiale przedstawiono na rys. 1.

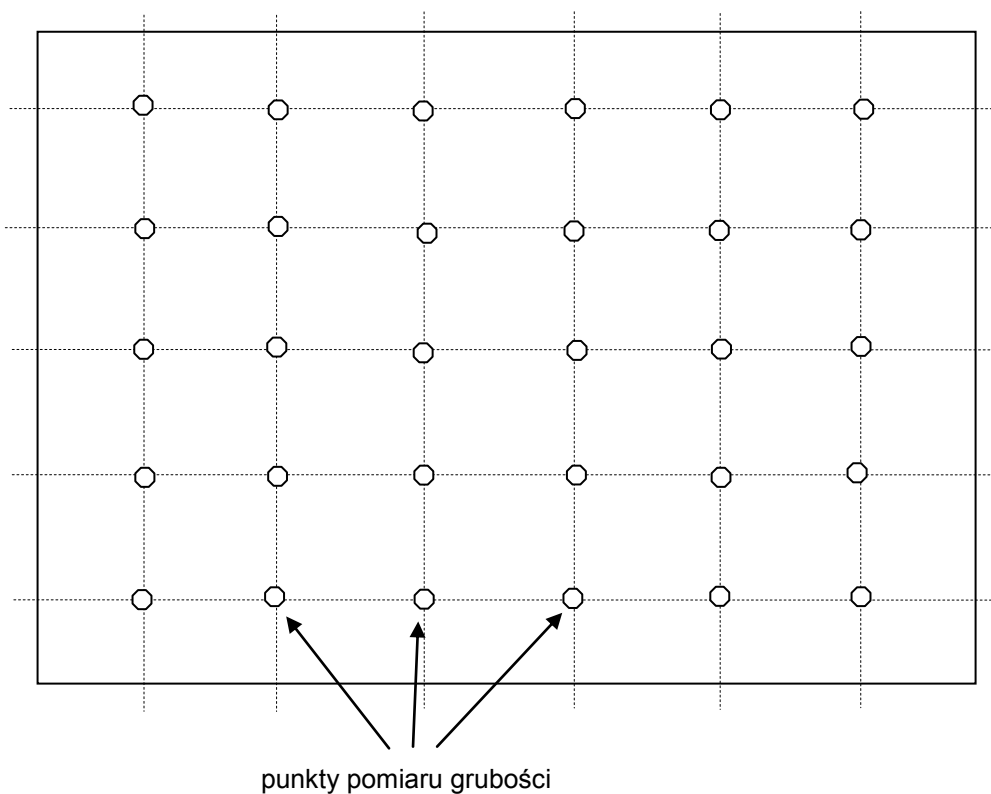


Rys. 1. Schemat rozwoju w materiale: a) korozji równomiernej, b) korozji zlokalizowanej

Podstawową cechą korozji równomiernej (także erozji) jest w miarę jednorodny ubytek grubości ścianki na całej powierzchni obiektu. Aby ocenić stopień zużycia tak korodującego obiektu wystarczy dokonać pomiarów grubości ścianki na odpowiednio dobranej siatce pomiarowej (rys. 2a) a następnie wyznaczyć wartość średnią oraz minimalną. Istotne jest aby gęstość siatki pomiarowej była dobrana tak by wylapać wszystkie potencjalne miejsca pocienień (zewnętrzne łuki kolanek rurociągów itp.). Odpowiedni dobór siatki pomiarowej musi wynikać ze znajomości warunków eksploatacji badanego obiektu oraz wyników badań wykonanych wcześniej na podobnych obiektach.

Porównując średnie oraz minimalne grubości ścianki z założeniami projektowymi lub specjalnie wykonanymi obliczeniami wytrzymałościowymi można ocenić, czy dany obiekt nadaje się do dalszej eksploatacji, czy też wymaga obniżenia parametrów eksploatacyjnych, naprawy bądź wymiany. Sukcesywne powtarzanie opisanych pomiarów ultradźwiękowych w określonych odstępach czasu pozwala na obliczanie szybkości ubytku średniej grubości ścianki i na tej podstawie szacowanie czasu jego dalszej bezpiecznej eksploatacji.

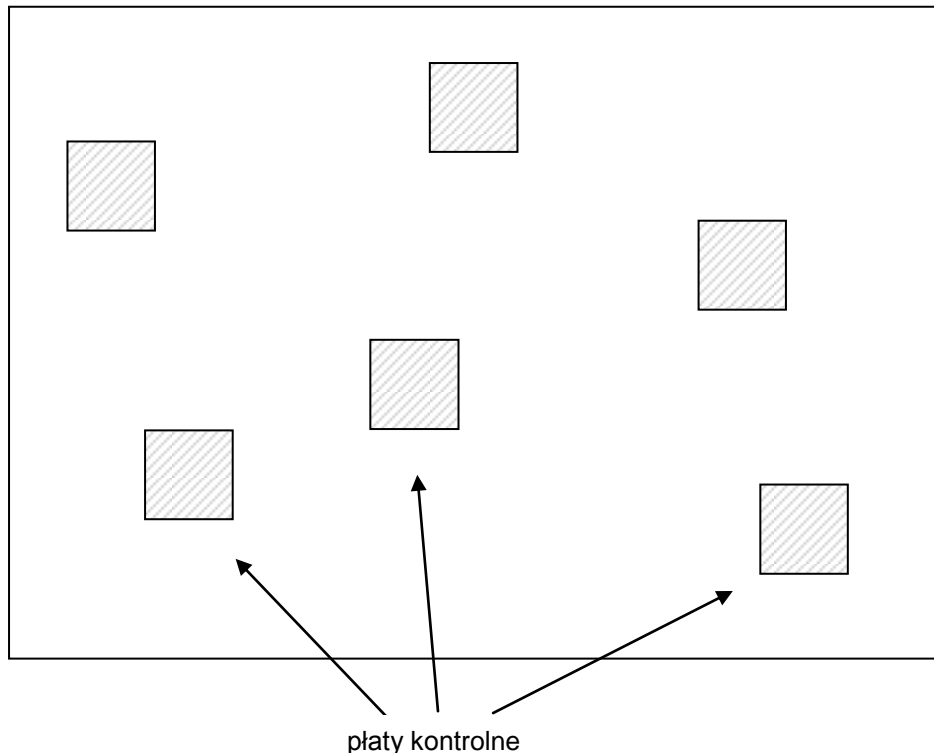
W przypadku korozji zlokalizowanej należy zauważyć, że charakteryzuje się ona bardzo nierównomiernym ubytkiem grubości ścianki nawet na stosunkowo małych fragmentach powierzchni. Typowym przykładem korozji zlokalizowanej jest korozja wżerowa (rys. 1b) jednak do tej kategorii zaliczyć można także korozję szczelinową oraz naprężeniową (SCC). W przypadku wystąpienia tego typu korozji o utracie przydatności eksploatacyjnej obiektu nie decyduje średni ubytek grubości ścianki lecz raczej głębokość maksymalnego wżeru korozyjnego, który prowadzi do perforacji ścianki. Sytuacja taka może wystąpić nawet wówczas gdy średnia grubość ścianki nie uległa większym zmianom.



Rys. 2. Schemat ultradźwiękowych badań ubytków korozyjnych przez punktowy pomiar pozostałej grubości ścianki w węzłach prostokątnej siatki pomiarowej.

W przypadku korozji zlokalizowanej podstawowym celem badań ultradźwiękowych powinno być określenie maksymalnej głębokości wżerów korozyjnych na całej powierzchni ścianki obiektu poddawanego ocenie. Problem polega na tym, że najgłębsze wżery występują jedynie na drobnym ułamku całkowitej powierzchni obiektu. Metoda pomiarów punktowych na siatce pomiarowej nie wchodzi tutaj w rachubę. Nawet przy stosunkowo gęstej siatce pomiarowej prawdopodobieństwo „trafienia” w najgłębsze wżery, których rozmiary poprzeczne mogą być rzędu kilku milimetrów, jest bliskie zera. Pierwszym rozwiązaniem jakie nasuwa się dla tak postawionego problemu jest przeprowadzenie pełnego skanowania ultradźwiękowego całej powierzchni. Niestety, poza nielicznymi wyjątkami, rozwiązanie takie nie jest możliwe do zastosowania w odniesieniu do dużych obiektów (rurociągi, zbiorniki) z powodów ekonomicznych i czasowych.

Znacznie efektywniejszym rozwiązaniem może być zastosowanie w tym celu badań ultradźwiękowych wspartych metodami statystycznymi. Podstawowa idea tego rodzaju badań polega na przeprowadzeniu dokładnego skanowania ultradźwiękowego jedynie niewielkich, losowo wybranych fragmentów ocenianej powierzchni (tzw. płatów kontrolnych) i poddaniu wyników badań analizie statystycznej pozwalającej na wyciągnięcie wniosków w odniesieniu do całej powierzchni. Podobna idea wykorzystywana jest przy wszelkiego rodzaju sondażach wyborczych, konsumenckich itp. Schemat ultradźwiękowych badań korozji opartych na metodzie statystycznej pokazano na rys. 3. Przed zagłębieniem się w dokładniejsze omówienie metodyki obliczeń statystycznych należy zwrócić uwagę na pewne wymagania odnoszące się do samych badań ultradźwiękowych wykonywanych na płatach kontrolnych.



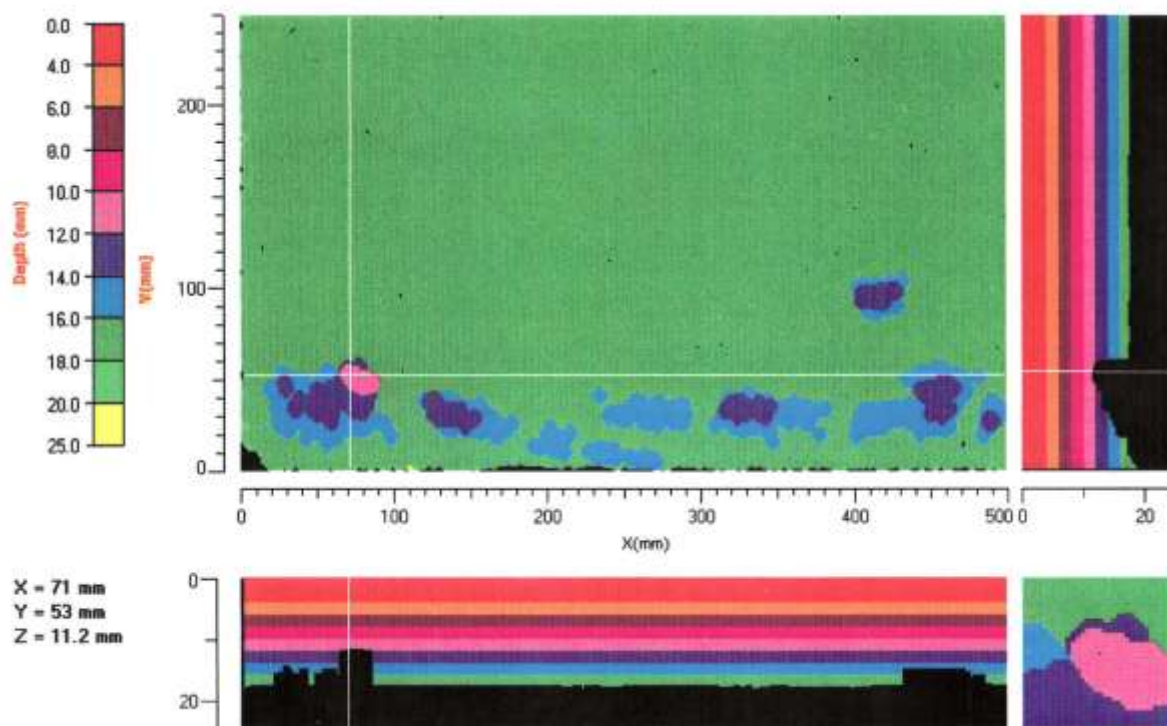
Rys. 3. Schemat badań ubytków korozyjnych metodą statystyczną – skanowanie ultradźwiękowe losowo wybranych płyt kontrolnych.

Podstawowym celem badania płyta kontrolnego jest wykrycie i określenie głębokości wszystkich poważniejszych wżerów korozyjnych występujących w jego obrębie oraz możliwie dokładne wyznaczenie głębokości wżeru najgłębszego. Aby to osiągnąć badanie ultradźwiękowe musi być wykonane techniką pełnego skanowania powierzchni ścianki ze 100% pokryciem. Zastosowana głowica powinna cechować się możliwie krótką strefą martwą oraz dobrą czułością na wady położone blisko powierzchni. W zależności od grubości ścianki można w tym celu zastosować głowicę podwójną lub (w przypadku ścianek najcieńszych) szerokopasmową głowicę normalną z linią opóźniającą. Czułość takiego badania musi być ustawiona znacznie wyżej niż ma to miejsce w przypadku klasycznych pomiarów grubości ścianki, w których rejestruje się echo dna. Musi ona zapewnić skuteczne wykrycie wierzchołków wżerów korozyjnych charakterystycznych dla badanego elementu a z drugiej strony nie prowadzić do nadmiernego poszerzenia strefy martwej oraz wzrostu poziomu szumów. W wielu przypadkach optymalna dla takich badań okazuje się czułość badania odpowiadająca wadzie równoważnej DSR o średnicy 1,5 - 2 mm.

Technika skanowania płyt kontrolnych może być całkowicie ręczna, ręczna z automatycznym zapisem, lub też całkowicie zautomatyzowana. W praktyce, ręczne skanowanie płyt kontrolnych nie daje gwarancji pełnego pokrycia powierzchni (brak wizualizacji procesu skanowania oraz jego zapisu) i co się z tym wiąże wiarygodnego określenia głębokości najgłębszego wżeru. Z drugiej strony technika całkowicie automatyczna wymaga konstruowania ciężkich i kosztownych mechanizmów skanujących, które muszą być dostosowane do kształtu oraz usytuowania obiektu. Ponieważ badania uszkodzeń korozyjnych z reguły wykonuje się na obiektach eksploatowanych o zróżnicowanym kształcie i w warunkach utrudnionego dostępu pełna automatyzacja urządzeń skanujących nie jest rozwiązaniem najbardziej efektywnym. W praktyce najszersze zastosowanie znalazły układy półautomatyczne z ręcznym prowadzeniem głowicy po

obiekcie oraz automatycznym zapisem przebiegu skanowania przez system komputerowy. Dane ultradźwiękowe (odległość pierwszego echa w bramce pomiarowej) przesyłane są z aparatu ultradźwiękowego do komputera i rejestrowane w powiązaniu ze współrzędnymi głowicy na obiekcie. Informacja o aktualnym położeniu głowicy jest najczęściej uzyskiwana z enkoderów układu prowadzącego, z którym musi być ona powiązana mechanicznie. Istnieją też rozwiązania ze swobodnym przesuwem głowicy bazujące na określaniu położenia głowicy z obrazu rejestrowanego przez kamerę obserwującą obszar skanowania w paśmie podczerwieni. W tym przypadku głowica musi być dodatkowo wyposażona w diodę emitującą promieniowanie podczerwone.

Niezależnie od rodzaju systemu śledzącego ruch głowicy komputer zapisuje współrzędne głowicy oraz odpowiadającą im wartość grubości ścianki pod głowicą. Ostatecznym efektem tego procesu jest komputerowa mapa grubości przeskanowanego obszaru materiału. Automatyczny zapis przebiegu skanowania daje informację o tym, jaki obszar powierzchni obiektu został faktycznie pokryty skanowaniem a ewentualne braki są wyraźnie uwidocznione innym kolorem. Przykład ultradźwiękowej mapy grubości ścianki zbiornika pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Ultradźwiękowa mapa grubości ścianki zbiornika w obszarze płyta kontrolnego o wymiarach 500x300mm uzyskana systemem Mapscan firmy RTD

Na podstawie zarejestrowanej mapy grubości program komputerowy może automatycznie wyznaczyć minimalną grubość ścianki oraz odpowiadającą jej maksymalną głębokość wżeru. Głębokość wżeru wyliczana jest jako różnica nominalnej (początkowej) grubości ścianki i grubości pozostałej zmierzonej ponad wierzchołkiem wżeru. Niezależnie od oceny dokonanej przez program operator ma możliwość samodzielnej analizy wyników badania na podstawie mapy grubości (zobrazowanie typu C) oraz przekrojów pionowych przez grubość ścianki (zobrazowania typu B). Jest to o tyle istotne, że wskazania zarejestrowane przez system nie zawsze muszą pochodzić od wierzchołków wżerów korozyjnych. Czasem mogą to być wskazania wad wewnętrznych typu rozwalcowanych wtrąceń lub rozwarstwień, pod którymi

znajduje się zdrowy materiał. Wskazania takie mogą być zazwyczaj odróżnione od wskazań wżerów korozyjnych na podstawie analizy przekrojów grubości ścianki. Efektem końcowym tej analizy powinno być określenie maksymalnej głębokości wżeru występującego na płacie kontrolnym.

Drugim parametrem jaki można określić na podstawie mapy grubości jest średnia grubość ścianki w obszarze płata kontrolnego. Parametr ten może być wyznaczony przez program komputerowy z wysoką dokładnością z uwagi na bardzo dużą liczbę punktów pomiarowych tworzących zobrazowanie. Niezależnie od wspomnianych parametrów liczbowych ultradźwiękowe mapy grubości dają dokładny obraz morfologii i nasilenia ubytków korozyjnych w materiale badanego obiektu. Pozwala na lepszą ocenę charakteru i przyczyn występującej korozji.

3. Statystyczna ocena korozji zlokalizowanej

3.1. Wybór płyt kontrolnych

Pierwszym etapem statystycznego badania korozji zlokalizowanej dużego obiektu jest określenie płyt kontrolnych, na których wykonane zostanie skanowanie ultradźwiękowe, czyli próbkowanie statystyczne populacji wżerów korozyjnych. Jak w każdym badaniu statystycznym próbka losowa musi być odpowiednio zaplanowana. W pierwszym rzędzie należy przeanalizować oceniany obiekt pod kątem jednorodności warunków powodujących korozję. Zazwyczaj nie są one jednakowe na całej powierzchni korodującego obiektu. Na podstawie znajomości warunków jego eksploatacji oraz zgromadzonych doświadczeń można wyróżnić strefy najbardziej i najmniej narażone na korozję. Przykładowo w przypadku rurociągów mogą to być dolne odcinki obwodu rury (np. ze względu na gromadzenie się agresywnych osadów) zaś w przypadku den zbiorników magazynowych obszary przy obwodzie zbiornika (ze względu na łatwiejszy dostęp powietrza i wilgoci). W każdym przypadku analiza taka musi dotyczyć konkretnego obiektu eksploatowanego w konkretnych warunkach a jej efektem powinien być podział obiektu na strefy o jednorodnych warunkach rozwoju korozji. Ocena statystyczna może być dokonywana wyłącznie w obrębie takiej pojedynczej strefy. Zazwyczaj wybiera się w tym celu strefę najbardziej narażoną na korozję, chociaż możliwe jest przeprowadzenie osobnych ocen dla każdej ze stref. Zdefiniowany podział oznacza, że wszystkie płyty kontrolne do badań ultradźwiękowych muszą być wybrane losowo w obrębie jednej, wstępnie ustalonej strefy. Wszystkie płyty powinny mieć jednakową powierzchnię.

Drugim ważnym problemem jest dobór wielkości oraz ilości płyt kontrolnych. Brak jest ściśle ustalonych reguł w tym zakresie ale przyjmuje się, że sumaryczny obszar skanowanych płyt nie powinien być mniejszy niż 2% całkowitej powierzchni ocenianej strefy obiektu. Wielkość płyt jest często zdeterminowana typem posiadanego systemu skanującego tak więc liczbę płyt należy wówczas dobrać tak aby uzyskać sumaryczne pokrycie obszaru strefy wynoszące przynajmniej 2%.

3.2. Rozkład statystyczny wartości ekstremalnych

Jak stwierdzono w poprzednim rozdziale głównym celem badań korozji zlokalizowanej jest określenie głębokości maksymalnych wżerów jakie mogą wystąpić na obszarze całego obiektu lub ściślej na obszarze wstępnie zdefiniowanej strefy obiektu o największym zagrożeniu korozją.

Zakładamy, że w wyniku przeprowadzonych badań ultradźwiękowych uzyskaliśmy mapy grubości losowo wybranych płyt kontrolnych obejmujących łącznie kilka procent ocenianej powierzchni. Na każdym z przebadanych płyt możemy dokładnie określić

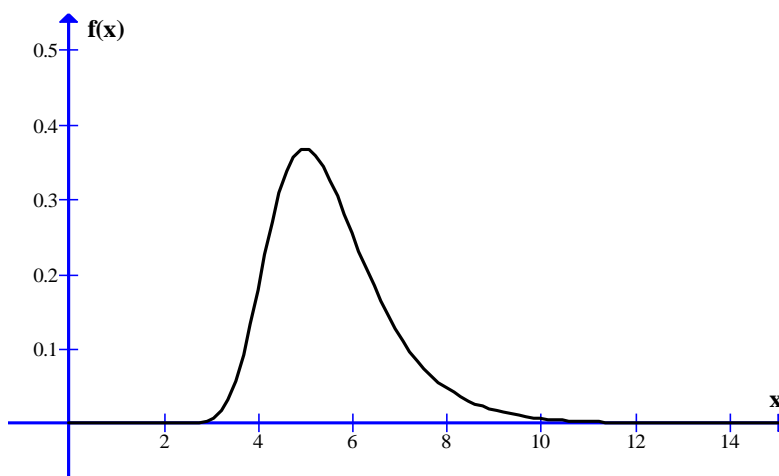
maksymalną głębokość wżeru. Jednak z punktu widzenia oceny stanu obiektu istotne jest pytanie jakie są najgłębsze wżery na całej jego powierzchni. Okazuje się, że przybliżoną odpowiedź na to pytanie można uzyskać metodami statystycznymi bez potrzeby fizycznego zbadania całej powierzchni obiektu. Metoda postępowania opiera się na statystycznej teorii wartości ekstremalnych sformułowanej i rozwiniętej przez niemieckiego matematyka E.J. Gumbela w latach 50-tych ubiegłego stulecia [2]. Przedmiotem zainteresowania tej teorii są rozkłady statystyczne wartości ekstremalnych (minimalnych lub maksymalnych) występujących w pewnych większych zbiorach wartości. Mogą to być np. maksymalne wartości poziomu wody w rzece w okresie roku, maksymalne wartości odszkodowań wypłaconych przez różne firmy ubezpieczeniowe czy też, jak ma to miejsce w naszym przypadku, maksymalne głębokości wżerów na płytach kontrolnych.

Okazuje się, że niezależnie od wielkiej różnorodności opisywanych zjawisk, wszystkie takie rozkłady można sprowadzić do jednego z trzech podstawowych typów rozkładów wartości ekstremalnych. W rozważanym przez nas przypadku jest to rozkład Gumbela typu I zwany również rozkładem podwójnie eksponencjalnym.

Funkcja gęstości prawdopodobieństwa dla tego rozkładu posiada dwa parametry i wyraża się wzorem:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-\lambda}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-\lambda}{\alpha}\right)\right] \quad (1)$$

Parametr λ nazywany jest *parametrem położenia* (określa położenie rozkładu na osi x) zaś parametr α *parametrem skali* (określa rozmycie rozkładu na osi x). Przykładowy wykres rozkładu gęstości prawdopodobieństwa wartości maksymalnych pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Wykres gęstości prawdopodobieństwa wartości maksymalnych obliczony dla przykładowych parametrów: $\lambda=5$ oraz $\alpha=1$.

Interpretacja powyższej funkcji w naszym przypadku jest następująca. Określa ona prawdopodobieństwo $f(x)$ znalezienia na losowo wybranym płacie kontrolnym maksymalnej głębokości wżeru o wartości x . Przykładowo dla rozkładu pokazanego na rys. 5 prawdopodobieństwo wystąpienia maksymalnego wżeru o głębokości 5 mm wynosi 0,38 zaś maksymalnego wżeru o głębokości 8 mm tylko 0,06.

W dalszej analizie bardziej przydatna będzie funkcja prawdopodobieństwa skumulowanego $F(x)$ zdefiniowana wzorem:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(s) ds = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{s-\lambda}{\alpha} - \exp\left(-\frac{s-\lambda}{\alpha}\right)\right] ds \quad (2)$$

który po wykonaniu całkowania prowadzi do funkcji podwójnie eksponencjalnej:

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\lambda}{\alpha}\right)\right] \quad (3)$$

Funkcja $F(x)$ zwana też dystrybuantą rozkładu Gumbela określa tutaj prawdopodobieństwo tego, że maksymalna głębokość wżeru na losowo wybranym płacie kontrolnym będzie mniejsza lub równa x . Oznacza to jednocześnie, że prawdopodobieństwo wystąpienia na płacie wżeru o głębokości większej niż x wynosi $1-F(x)$. Z tej informacji można z kolei wydedukować ile płyt kontrolnych należałoby (średnio rzecz biorąc) przetestować aby w końcu trafić na wżer o głębokości przewyższającej x . Określa to wzór:

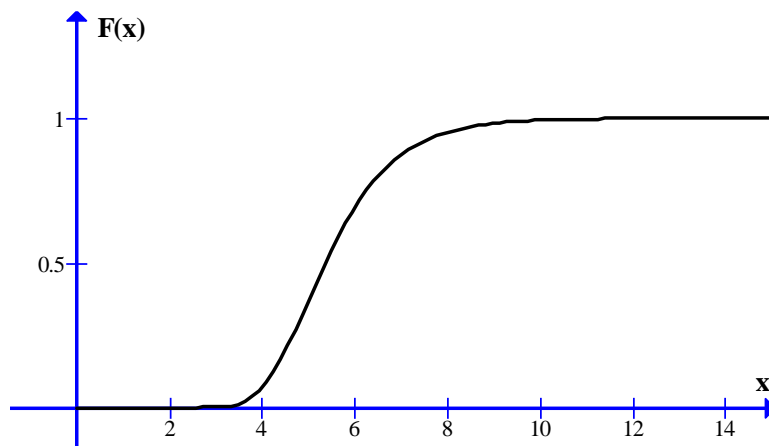
$$T = \frac{1}{1-F(x)} \quad (4)$$

gdzie T nazywane jest okresem powrotu wartości x . Mnożąc T przez powierzchnię jednego płyta kontrolnego uzyskujemy z kolei powierzchnię po jakiej przebadaniu należy (średnio rzecz biorąc) spodziewać się wystąpienia wżeru głębszego niż x . Jeśli ta powierzchnia jest równa powierzchni ocenianej strefy wówczas x możemy traktować jako estymatę (statystyczną ocenę) głębokości najgłębszego wżeru na obszarze tej strefy.

Oczywiście aby można było praktycznie zastosować opisaną procedurę należy, na podstawie wyników badań na płytach kontrolnych, określić parametry rozkładu Gumbela dla populacji wżerów występujących na ocenianej powierzchni. Najprościej można to osiągnąć przy wykorzystaniu tzw. wykresów prawdopodobieństwa.

3.3. Wykres prawdopodobieństwa

Wykres funkcji skumulowanego prawdopodobieństwa $F(x)$ odpowiadający funkcji gęstości prawdopodobieństwa z rys. 5 ma w zwykłych współrzędnych liniowych postać pokazaną na rys. 6.

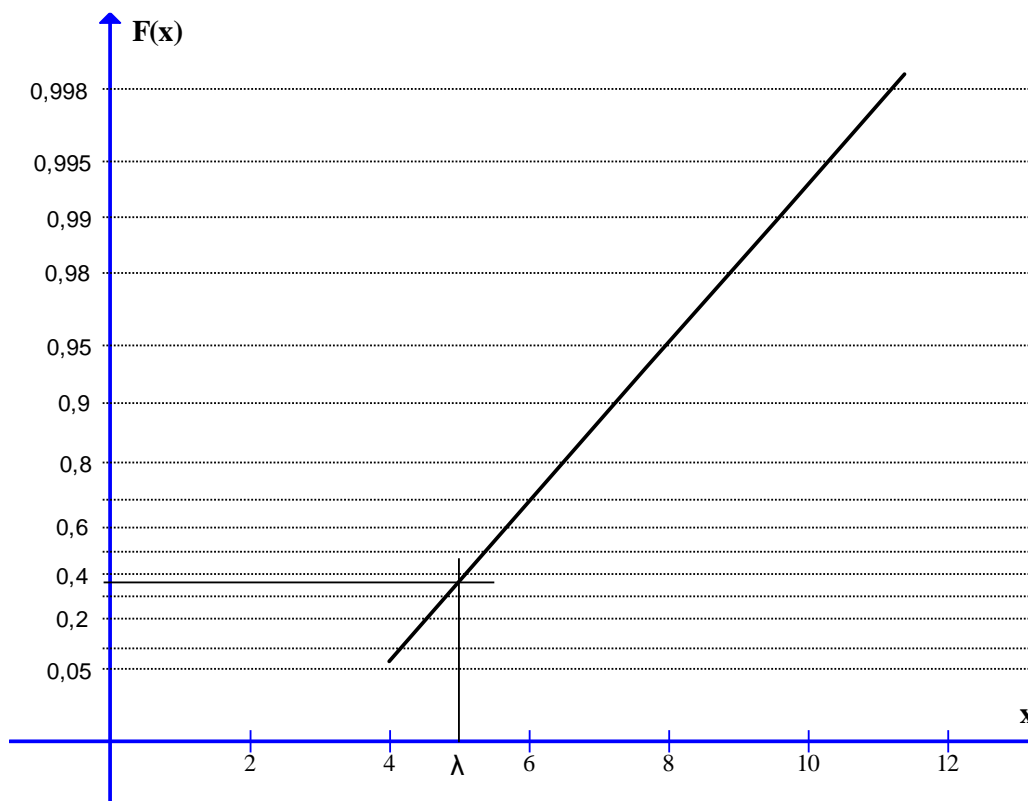


Rys. 6. Wykres funkcji $F(x)$ we współrzędnych liniowych dla parametrów: $\lambda=5$ oraz $\alpha=1$.

Ponieważ funkcja $F(x)$ jest z definicji funkcją monotonicznie rosnącą można tak dobrać skalę osi pionowej, aby wykres $F(x)$ był w nowych współrzędnych linią prostą. Odpowiednie przekształcenie osi F w nową oś y ma postać:

$$y = -\ln \left(1 - \frac{F(x)}{F_{\max}} \right) \quad (5)$$

W tak skonstruowanym układzie współrzędnych wszystkie funkcje $F(x)$ opisujące rozkłady Gumbela będą liniami prostymi. Łatwo się o tym przekonać podstawiając do wzoru (5) wartość $F(x)$ wyrażoną wzorem (3).



Rys. 7. Wykres funkcji $F(x)$ w nowym układzie współrzędnych.

Nachylenie prostej odpowiada przy tym odwrotności parametru α rozkładu Gumbela zaś punkt jej przejścia przez poziom $F=0,368$ ($y=0$) parametrowi λ .

Układ współrzędnych ze skalą prawdopodobieństw rozkładu wartości maksymalnych można wykorzystać do znalezienia rozkładu najbardziej pasującego do zgromadzonych danych doświadczalnych. W tym celu na wykres nanosi się punkty odpowiadające maksymalnym głębokościom wżerów na przebadanych płytach kontrolnych. Jeśli punkty te ułożą się (z rozsądnym rozrzutem) wzdłuż linii prostej będzie to oznaczać, że pasują one do jakiegoś rozkładu typu Gumbela. Parametry tego rozkładu będą jednoznacznie określone przez nachylenie prostej oraz punkt jej przecięcia z linią $F=0,368$. Opisana metoda znajdowania parametrów rozkładu statystycznego za pomocą wykresu ma tę zaletę w stosunku do metod czysto analitycznych, że umożliwia szybką, intuicyjną weryfikację tego czy zgromadzone dane doświadczalne faktycznie pasują do zakładanego typu rozkładu tj. układają się wzdłuż linii prostej. Jest to podstawowy warunek poprawności i dokładności całej opisywanej metodyki statystycznej.

Szczegółową procedurę analizy wyników badań ultradźwiękowych korozji zlokalizowanej przy wykorzystaniu wykresu prawdopodobieństwa omówiono dalej na konkretnym przykładzie.

4. Statystyczna ocena korozji wżerowej ścianki zbiornika

Przedmiotem badania był zbiornik magazynowy na ropę będący w eksploatacji przez kilkanaście lat. W oparciu o doświadczenia z remontów podobnych zbiorników ustalono, że z uwagi na gromadzenie się wody i zanieczyszczeń przy dnie zbiornika, najbardziej narażona na korozję wżerową jest strefa płaszcza zbiornika do wysokości ok. 30 cm od dna.

Średnica zbiornika wynosiła 60 m tak więc całkowita długość tej strefy, równa obwodowi zbiornika, wynosiła aż 188 m. Pełne badanie ultradźwiękowe takiej powierzchni nie wchodziło w rachubę ze względów ekonomicznych i czasowych toteż zdecydowano się na badanie statystyczne na płytach kontrolnych. Na obwodzie zbiornika wyznaczono w sposób losowy 19 płyt kontrolnych o długości 50cm i wysokości 30cm każdy. Łączna powierzchnia płyt stanowiła więc ok. 5% całkowitej powierzchni strefy narażonej na korozję poddawanej ocenie.

Przeprowadzono skanowanie ultradźwiękowe wszystkich 19 płyt kontrolnych uzyskując mapy grubości ścianki podobne do pokazanej na rys.4. Na tej podstawie dla każdego z przebadanych płyt kontrolnych wyznaczono maksymalną głębokość występującego na nim wżeru. Wyniki tych pomiarów zestawiono w tabeli 1 ustawiając je w kolejności rankingowej od wartości najmniejszej do największej.

Ranking i	Max głęb. wżeru x_i [mm]	$F(x_i) =$ $i/(N+1)$	Ranking i	Max głęb. wżeru x_i [mm]	$F(x_i) =$ $i/(N+1)$
1	1,2	0,05	11	3,2	0,55
2	1,3	0,10	12	3,4	0,60
3	1,5	0,15	13	3,5	0,65
4	1,8	0,20	14	3,6	0,70
5	2,1	0,25	15	4,2	0,75
6	2,2	0,30	16	4,4	0,80
7	2,2	0,35	17	4,9	0,85
8	2,5	0,40	18	5,2	0,90
9	2,7	0,45	19	5,8	0,95
10	3,0	0,50	liczba płyt N =19		

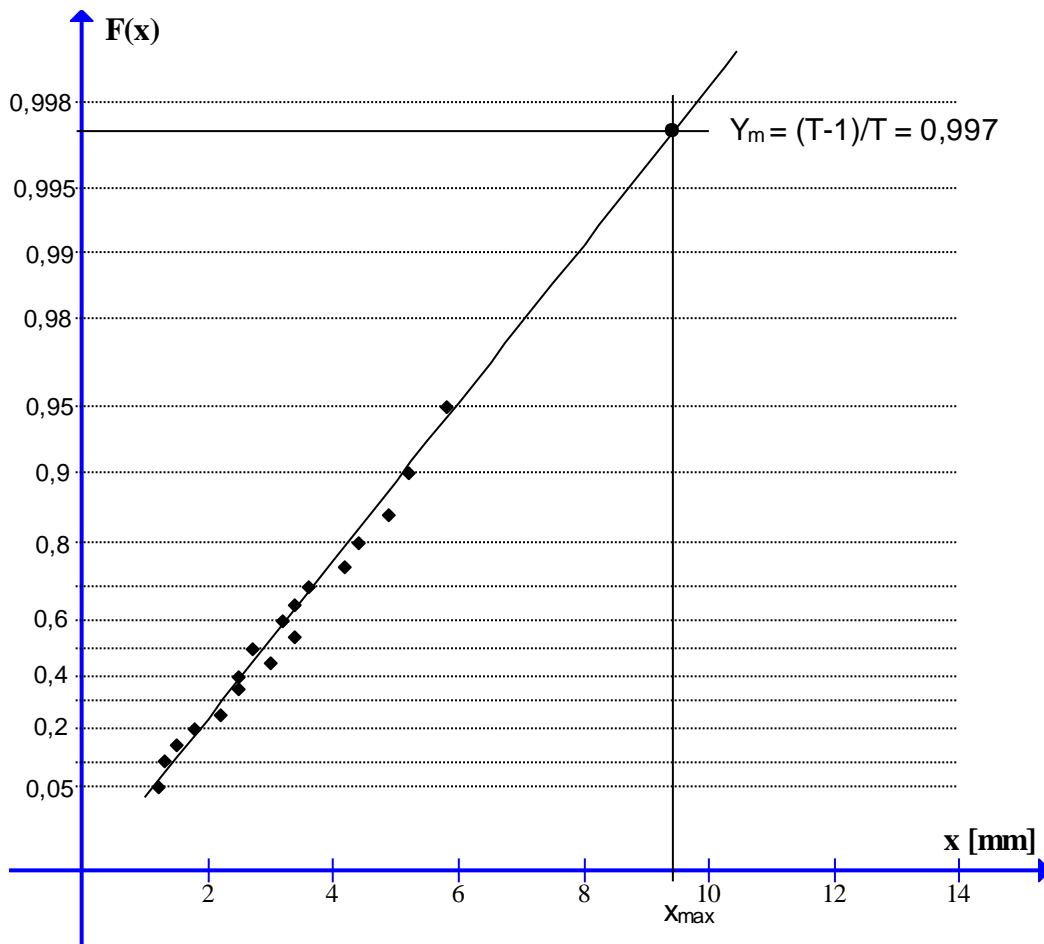
Tab. 1. Zestawienie maksymalnych głębokości wżerów na płytach kontrolnych ustawione w kolejności rankingowej od najmniejszego do największego.

Ustawienie wyników pomiarów w kolejności rosnącej pozwala na przypisanie im numerów rankingowych i , z których wylicza się odpowiadające im skumulowane prawdopodobieństwa wystąpienia $F(x_i)$.

$$F(x_i) = \frac{i}{N+1} \quad (6)$$

N oznacza tutaj całkowitą liczbę wartości maksymalnych uzyskanych z pomiarów czyli jest równe liczbie płyt kontrolnych. Zastosowany sposób obliczania prawdopodobieństw $F(x_i)$ dla wyników doświadczalnych określany jest w literaturze jako *Average Rank Method* i jest wystarczająco dokładny w przypadku dopasowywania większej liczby wyników pomiarów. Istnieją też bardziej zaawansowane techniki statystyczne np. metoda MVLUE, które wymagają jednak zastosowania do obliczeń specjalnych programów komputerowych.

Wartości x_i oraz odpowiadające im wartości prawdopodobieństw skumulowanych $F(x_i)$ można zobrazować w postaci punktów na wykresie prawdopodobieństwa dla rozkładu Gumbela. Wykres, z punktami wyszczególnionymi w tabeli 1 pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Wykres obrazujący dopasowanie rozkładu Gumbela (linia prosta) do rozkładu głębokości wżerów maksymalnych na 19 płytach kontrolnych.

Punkty odpowiadające wynikom pomiarów układają się z niewielkim rozrzutem wzdłuż linii prostej co oznacza, że próbkowany rozkład maksymalnych głębokości wżerów na płytach można faktycznie opisać rozkładem typu Gumbela. Rozkład ten obrazowany jest linią prostą dopasowaną do punktów pomiarowych.

Mając rozkład statystyczny maksymalnych głębokości wżerów na płytach można, bezpośrednio z wykresu, wyznaczyć głębokość maksymalnego wżeru dla całej ocenianej powierzchni płaszcza zbiornika (strefa o długości 188 m i wysokości 30 cm).

W pierwszym rzędzie należy określić liczbę płyt kontrolnych koniecznych do pokrycia całej ocenianej strefy zbiornika:

$$T = 188m / 0,5m = 376 \quad (7)$$

Na jednym z tych 376 płytów wystąpi wżer najgłębszy dla całej strefy. Tak więc prawdopodobieństwo trafienia na najgłębszy wżer podczas badania losowo wybranego płyta jest równe $1/T$. Prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia przeciwnego czyli takiego, że podczas badania losowo wybranego płyta nie trafi się na najgłębszy wżer jest równe:

$$F(x_{\max}) = 1 - \frac{1}{T} = 1 - 0,00266 \approx 0,997 \quad (8)$$

Prawdopodobieństwo to zostało oznaczone symbolem $F(x_{\max})$ gdyż, w istocie, jest to zdefiniowane wcześniej prawdopodobieństwo skumulowane tj. prawdopodobieństwo tego, że maksymalny wżer znaleziony na losowo wybranym płacie jest mniejszy lub równy x_{\max} .

Mając obliczone prawdopodobieństwo skumulowane $F(x_{\max})$ znajdujemy na wykresie odpowiadający mu punkt x_{\max} (patrz rys. 8). Jest to najbardziej prawdopodobna maksymalna głębokość wżeru dla całej ocenianej strefy. W rozpatrywanym przykładzie płaszcz zbiornika magazynowego wynosi ona 9,4 mm.

Przedstawiona procedura obróbki statystycznej wyników badań korozji wżerowej jest nieco skomplikowana i pracochłonna. Istnieją jednak programy komputerowe pozwalające na znaczne ułatwienie oraz rozbudowanie analizy statystycznej tego rodzaju danych. Stosunkowo prosty program StatKor (rys. 9) pozwala na uzyskanie dopasowania rozkładu statystycznego wartości minimalnych grubości ścianki zarówno opisaną wcześniej metodą rankingową jak i dokładniejszą metodą MVLUE. Dodatkowo umożliwia określanie błędu statystycznego (przedziału ufności) przewidywanej grubości minimalnej a także wyliczanie prawdopodobieństwa przekroczenia na ocenianym obiekcie założonej wartości grubości krytycznej.

Obliczenia statystyczne korozji wżerowej metodą MVLUE

Obiekt: 2-DN500

Pole powierzchni obiektu:
Ptot [m²] = 78,54

Liczba płyt kontrolnych:
N = 20

Powierzchnia płyta kontrolnego:
Ppl [m²] = 0,02

Nominalna grubość ścianki:
Tnom [mm] = 16

Krytyczna grubość ścianki:
Tkr [mm] = 5

Metoda statystyczna
 MVLUE RANK

m	Poz	Tm	F(Tm)	Ym	aNn	bNn
1	5	14,70	0,048	-1,113	0,117	-0,229
2	6	14,20	0,095	-0,855	0,095	-0,095
3	16	13,10	0,143	-0,666	0,084	-0,056
4	15	13,00	0,190	-0,506	0,076	-0,032
5	8	12,70	0,238	-0,361	0,069	-0,015
6	9	12,50	0,286	-0,225	0,064	-0,003
7	12	12,40	0,333	-0,094	0,059	0,007
8	7	12,30	0,381	0,036	0,055	0,014
9	3	11,70	0,429	0,166	0,050	0,020
10	10	11,60	0,476	0,298	0,047	0,025
11	14	11,50	0,524	0,436	0,043	0,029

Prawdopodobna minimalna grubość ścianki:
Tmin = 1,4 mm = 8,6 %

Średni błąd standardowy grubości minimalnej:
Sigma = 2,1 mm

Prawdopodobieństwo przekroczenia grubości krytycznej:
P (Tmin < Tkr) = 100,000

Buttons: Oblicz, Wykres, Drukuj, Losowanie, Zachowaj, Otwórz

Rys. 9. Okienko dialogowe programu StatKor do obróbki statystycznej wyników badań ultradźwiękowych korozji zlokalizowanej.

5. Podsumowanie

Metoda ultradźwiękowa jest ciągle jedną z najskuteczniejszych metod badania i oceny uszkodzeń korozyjnych eksploatowanych obiektów i urządzeń. Istotne jest jednak aby metodyka badań ultradźwiękowych była dostosowana do specyfiki uszkodzeń korozyjnych występujących na badanym obiekcie. Powszechnie stosowana metoda pomiarów grubości ścianki na siatce pomiarowej jest wystarczająca jedynie w przypadku gdy korozja lub erozja ma charakter równomierny. W przypadku korozji zlokalizowanej, np. wżerowej, bardziej adekwatne jest badanie przeprowadzone metodą statystyczną z pełnym skanowaniem losowo wybranych pól kontrolnych.

W artykule opisano zasady statystycznego opracowania wyników takich badań w oparciu o rozkład Gumbela typu I dla wartości maksymalnych. Przedstawiona metoda polega na graficznym zobrazowaniu wyników badań na wykresie prawdopodobieństwa i dokonaniu odpowiednich ekstrapolacji. W wyniku uzyskuje się ocenę głębokości maksymalnego wżeru jaki może wystąpić na powierzchni ścianki obiektu. W przypadku korozji zlokalizowanej jest to parametr bardziej miarodajny dla oceny stanu technicznego obiektu niż średnia grubość ścianki.

Opisana metodyka statystycznych badań korozji zlokalizowanej powinna być znacznie szerzej stosowana w krajowym przemyśle niż ma to miejsce obecnie. Sprzyjającym czynnikiem jest tutaj pojawienie się coraz szerszej gamy systemów ultradźwiękowych umożliwiających sporządzanie ultradźwiękowych map grubości ścianki a także dostępność specjalistycznego oprogramowania do statystycznej analizy wyników takich badań.

Literatura

1. S. Mackiewicz, M. Śliwowski, Metody badania ubytków korozyjnych, Wykłady dziewiątego seminarium szkoleniowego Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane 2004
2. Gumbell, E.J., Statistics of Extremes, Columbia University Press, 1958.
3. Coordinating Editor: M. Kowaka, Introduction to Life Prediction of Industrial Plant Materials. Application of the Extreme Value Statistical Method for Corrosion Analysis, Allerton Press, Inc., New York 1994
4. Eldredge, G.G., Analysis of Corrosion Pitting by Extreme-Value Statistics and its Applications to Oil Tubing Caliper Surveys, Corrosion, Vol.13, 1957, pp 67-76.
5. Finley, H.F. and A.C. Toncre, Extreme-Value Statistical Analysis in Correlation of First Leak on Submerged Pipelines, Corrosion, Vol.20, Sep. 1964, pp.29-35.
6. N.R. Joshi, Statistical Analysis of UT Corrosion Data from Floor Plates of a Crude Oil Aboveground Storage Tank., Materials Evaluation, July 1994.