

NIEPEWNOŚĆ I WIARYGODNOŚĆ BADAŃ NIENISZCZĄCYCH



MGR INŻ. PAWEŁ GRZEŚKOWIAK

Główny Specjalista ds. Badań Materiałowych
Dział Badań Laboratoryjnych w Poznaniu
Urząd Dozoru Technicznego



CLDT

Wykonując badania, powinniśmy zastanowić się nad ich wiarygodnością oraz określić, w jakim stopniu zastosowanie danej metody lub techniki badań nieniszczących spełnia założone cele. Parametrem związanym z wynikiem pomiaru, charakteryzującym rozrzut wartości, które można w uzasadniony sposób przypisać wielkości mierzonej, jest NIEPEWNOŚĆ POMIARU.

W badaniach nieniszczących, przynajmniej w ich części dotyczącej wykrywania nieciągłości, mamy do czynienia z sytuacją bardziej skomplikowaną niż w przypadku np. badań wytrzymałościowych. W badaniach tych uzyskujemy wskazania, sygnały lub zobrazowania powstające w wyniku oddziaływania ośrodków lub pól fizycznych ze strukturą badanego materiału mogącą zawierać nieciągłości lub inne niedoskonałości.

Wskazania od nieciągłości materiału, charakterystyczne dla danej metody badania, są rejestrowane, analizowane, interpretowane i oceniane. Przykładami takich wskazań mogą być np.:

- echo od nieciągłości w badaniach ultradźwiękowych,
- obraz powstający na radiogramie,
- wskazania na powierzchni materiału podczas badań penetracyjnych lub magnetyczno-proszkowych,
- sygnał akustyczny od nieciągłości aktywnej dla metody emisji akustycznej.

KRZYWE POD

ILOŚCIOWE OKREŚLANIE WIARYGODNOŚCI

W badaniach nieniszczących powszechną praktyką stało się ilościowe określanie wiarygodności wykrywania nieciągłości pod względem PRAWDOPODOBIENSTWA WYKRYCIA (POD – z ang. Probability of Detection) i PRAWDOPODOBIENSTWA FAŁSZYWEGO WSKAZANIA (PFI – z ang. Probability of False Indication).

W badaniach nieniszczących zakładamy, że szacowana nie jest niepewność pomiaru, lecz NIEPEWNOŚĆ BADANIA / NIEPEWNOŚĆ WYKRYWANIA, jako parametr charakteryzujący wątpliwość co do wyniku badania.

Często spotykamy się z terminem „wada”. To kontrowersyjne pojęcie, ponieważ trudno określić, co jest wadą. **Jeżeli weźmiemy pod uwagę, że każde odchylenie od idealnego stanu stanowi o tym, że mamy do czynienia z wadą, to nawet najmniejszy defekt w strukturze materiału mógłby zostać zinterpretowany jako wada. Dlatego wykrywanie nieciągłości musi uwzględniać praktyczne aspekty.**

Wykrywanie nieciągłości w badaniach nieniszczących odbywa się zazwyczaj z zastosowaniem środków pośrednich, a zatem to, czy nieciągłość zostanie wykryta, zależy od wielu czynników.

Na niepewność wyniku badania mają wpływ różne elementy związane między innymi z:

- wiedzą na temat ograniczeń metody czy techniki badania,
- wpływem aparatury,
- warunkami badania,
- czułością metody,
- czynnikiem ludzkim – poziom wiedzy, doświadczenie, dyspozycja psychofizyczna w czasie prowadzenia badań.

Wskazania uznane za istotne powinny umożliwić rozpoznanie nieciągłości (liniowa, punktowa, pęknięcie, pęcherz, wtrącenie itp.), przybliżone określenie rozmiarów tej nieciągłości oraz jej położenie.

Dopiero te dane pozwalają na klasyfikację wskazania (lub nieciągłości) jako akceptowanego lub nieakceptowanego – wady.

PRAWDOPODOBIENSTWO WYKRYCIA POD

RZECZYWISTA KRZYWA POD

Wykrycie nieciągłości, czyli uzyskanie wskazania, jak też jej rozpoznanie, oszacowanie rozmiarów, nasilenia, ustalenie położenia itd., są obarczone mniejszą lub większą niepewnością. Dodatkowo część wskazań uznanych przez nas za istotne może być wskazaniami fałszywymi, pojawiającymi się w wyniku oddziaływania geometrii obiektu, stanu powierzchni, kształtu nieciągłości, mogą to być również wskazania będące wynikiem szumów pochodzących od aparatury badawczej.

W przypadku badań nieniszczących istnieją cztery możliwe wyniki badania.	
Materiał z nieciągłością – badanie wykazuje jej występowanie	PRAWDZIWE (+)/TP
Materiał bez nieciągłości – badanie wykazuje jej występowanie	FAŁSZYWE (+)/FP
Materiał z nieciągłością – badanie nie wykazuje jej występowania	FAŁSZYWE (-)/FN
Materiał bez nieciągłości – badanie nie wykazuje jej występowania	PRAWDZIWE (-)/TN

- To są podstawy koncepcji POD. W badaniach nieniszczących koncepcja ta została wypracowana w NASA w latach 70. XX wieku.
- POD stosowane jest dla oszacowania minimalnego rozmiaru nieciągłości, która zostanie niezawodnie wykryta za pomocą danej metody/techniki badań nieniszczących.
- W praktyce robi się to, konstruując wykres przedstawiający liczbę wszystkich wykrytych nieciągłości w odniesieniu do rozmiaru nieciągłości wykrytych lub powodujących odpowiedź powyżej istotnego progu.

W idealnym przypadku wszystkie nieciągłości powyżej pewnego istotnego (krytycznego) progu zostaną wykryte, a nieciągłości mniejsze nie będą wykrywane. Narzędziem najczęściej używanym do opisu prawdopodobieństwa wykrycia jest **KRZYWA POD**.

Krzywe te były zwykle konstruowane empirycznie. Najbardziej znaną metodą jest ROUND ROBIN TESTING (RRT) (badania na próbkach obiegowych), w której grupa operatorów przeprowadza badania nieniszczące próbki ze sztucznymi nieciągłościami.

- Sztuczne nieciągłości mają różne wymiary i kształty.
- Krzywe POD mogą być tworzone na podstawie wyników jednego operatora lub na podstawie wyników grupy operatorów.

Analiza metodologii RRT wskazuje na poniżej opisane problemy.

- Niezbędna jest duża liczba próbek do badań gwarantująca statystyczną wiarygodność oszacowanej krzywej.
- Złożoność i trudność uzyskania sztucznych defektów w wymiarze, położeniu i cechach zbliżonych do rzeczywistych nieciągłości.

PRZYKŁAD

Złącza spawane z odpowiednimi nieciągłościami, symulującymi rzeczywiste nieciągłości spotykane w badaniach, są w stanie wykonywać tylko wykwalifikowani, doświadczeni i dobrze wyszkoleni spawacze. Jest to niezbędne, aby uzyskiwać reprezentatywne wyniki POD.

W przypadku NIEPEWNOŚCI/WIARYGODNOŚCI NDT posługujemy się takimi pojęciami, jak:

- prawdopodobieństwo wykrycia nieciągłości **POD** (Probability of Detection),
- prawdopodobieństwo rozpoznania nieciągłości **POR** (Probability of Recognition),
- prawdopodobieństwo wykrycia fałszywych wskazań **PFI (A)** (Probability of False Indication (Alarm)).

Zasady obliczania POD wg metody „trafienie/chybiecie”

- POD jest równe prawdopodobieństwu TP i można je obliczyć w następujący sposób:

$$POD = P(TP) = \frac{TP}{(TP + FN)}$$

- dla jednej konkretnej nieciągłości, o konkretnej wielkości – „a”, równanie to można również przedstawić jako liczbę pozytywnych badań (podzieloną przez całkowitą liczbę badań ($n_{tot}(a)$)):

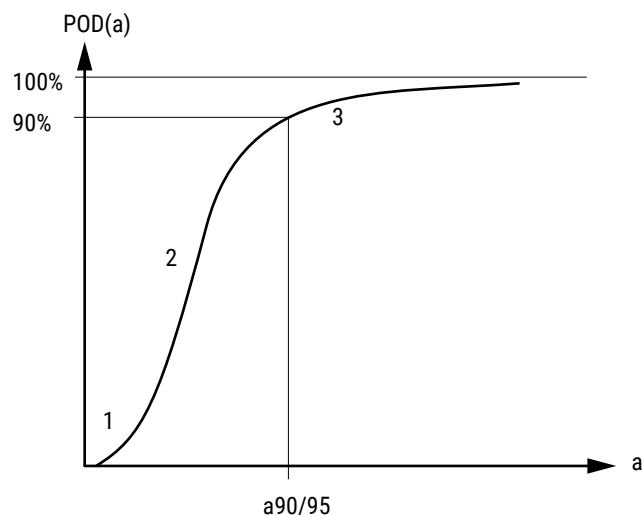
$$POD(a) = \frac{n_{pos}(a)}{n_{tot}(a)}$$

Możliwość uzyskania fałszywych wskazań – fałszywego alarmu PFI(A)

$$PFI(A) = P(FP) = \frac{FP}{(FP + TN)}$$

Oprócz POD istnieje druga możliwość opisu niepewności wyników badań. Prawdopodobieństwo wykrycia fałszywych wskazań **PFI** koncentruje się na **fałszywych wskazaniach pochodzących od nieistniejących nieciągłości**. PFI(A) jest obliczane analogicznie do POD, ale zamiast TP i FN podstawiane są wyniki FP i TN:

Prawdopodobieństwo wykrycia nieciągłości POD jest miarą opisującą dokładność badania. Ta metoda statystyczna określa, w jakim stopniu procedura badania pozwala na wykrywanie istotnych, zdefiniowanych niedoskonałości.



Rys. 1. Krzywa POD [1]

Odcinek (1) im mniejsze nieciągłości, tym mniejsze jest prawdopodobieństwo ich wykrycia

Odcinek (2) im większe nieciągłości, tym większe prawdopodobieństwo ich detekcji

Odcinek (3) wszystkie nieciągłości o wielkości „a” 90/95 są wykrywane, z prawdopodobieństwem 90% przy 95-procentowym poziomie ufności – dopiero w tym obszarze możliwe jest rzetelne badanie NDT.

Wykrycie nieciągłości o wielkości „a” 90/95 zależy zarówno od metody/techniki badań nieniszczących, jak i czułości układu pomiarowego.

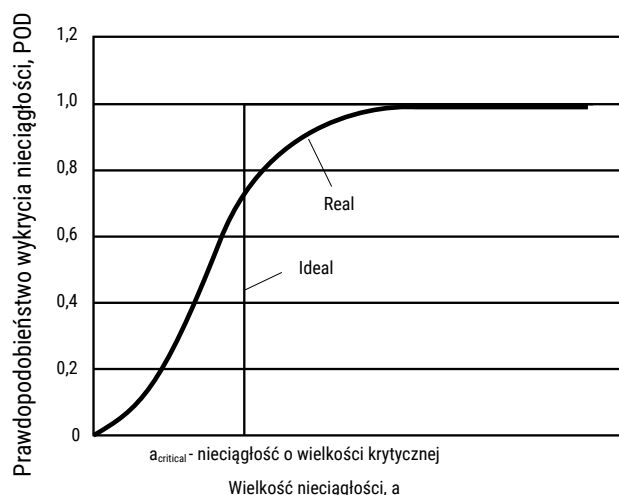
Krzywa POD pokazuje szacunkową zdolność wykrywania nieciągłości w zależności od jej rozmiaru dla danej metody/techniki badań.

- W idealnej metodzie/technice badawczej POD dla nieciągłości mniejszych niż ustalony wymiar krytyczny miałoby wartość zero.

- Z drugiej strony nieciągłości o wielkości większej niż wymiar krytyczny miałyby POD równe 1 lub 100% prawdopodobieństwa wykrycia.

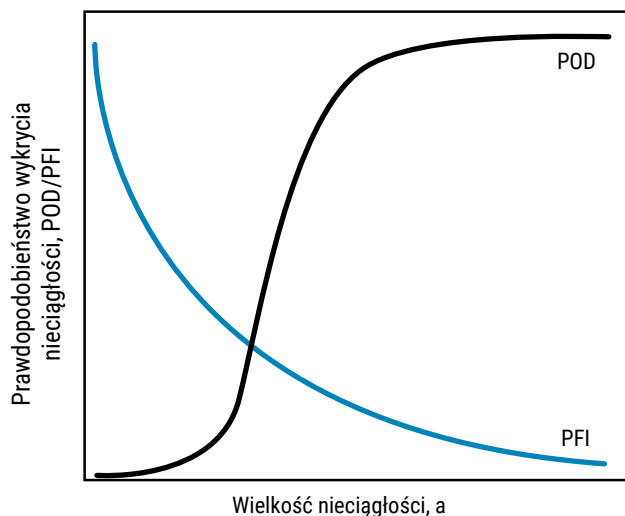
W idealnym przypadku moglibyśmy mieć wynik fałszywie dodatni (odrzućenie dopuszczalnych nieciągłości) lub fałszywie ujemny (zatwierdzenie nieciągłości niedopuszczalnych).

W RZECZYWISTOŚCI KRZYWE POD NIE SĄ IDEALNE, PONIEWAŻ ZAWIERAJĄ ODCINKI FAŁSZYWIE DODATNIE I FAŁSZYWIE UJEMNE.



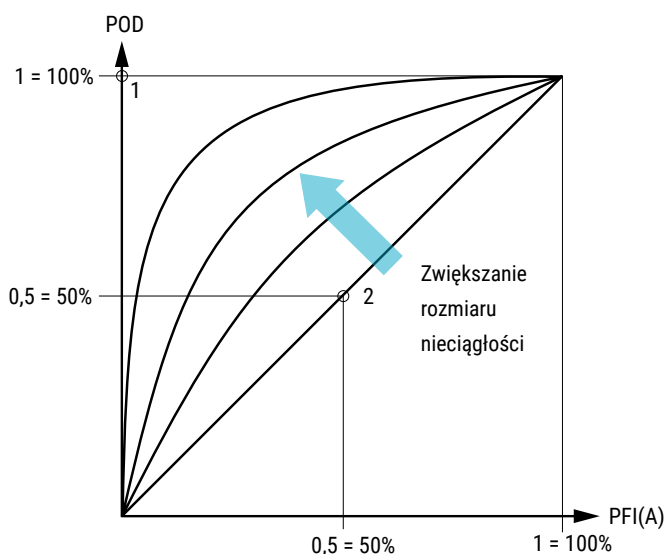
Rys. 2. Krzywa POD rzeczywista i idealna [2]

Prawdopodobieństwo wykrycia nieciągłości POD oraz prawdopodobieństwo wystąpienia fałszywych wskazań PFI(A) zależą głównie od rodzaju nieciągłości i rozmiarów nieciągłości oraz przyjętego poziomu badania.



Rys. 3. Wykres ilustrujący POD/PFI w zależności od wielkości nieciągłości [2]

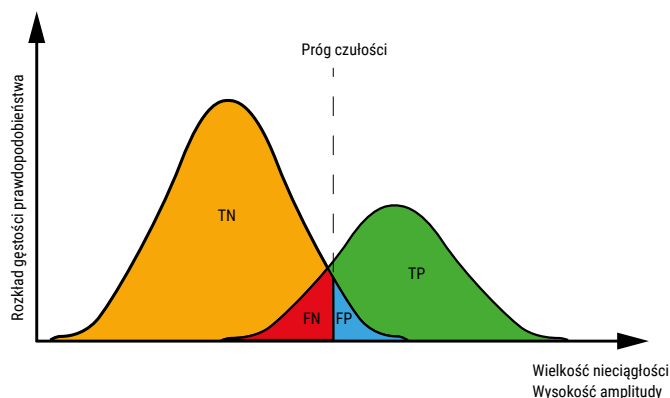
Wartości POD i PFI(A) naniesione na wykres dają w wyniku krzywą zwaną **operacyjną charakterystyką wiarygodności ROC (Reliability Operating Characteristic)**.



Rys. 4. Przykładowa krzywa ROC – podejście do względnej charakterystyki operacyjnej (ROC) jako ilościowego określania wiarygodności badania [2, 9]

Punkt 1 na rys. 4 przedstawia wynik idealny z PFA równym 0 i POD równym 1.
Punkt 2 to wynik tzw. zgadywacza (50/50%).

Koncentrując się na jednej określonej krzywej ROC i podążając za tą krzywą od lewego dolnego do prawego górnego narożnika, można zaobserwować, że czułość systemu wzrasta.



Rys. 5. Rozkłady statystyczne możliwych wskazań mogących wystąpić podczas badań i ich kompilacje [1]

Rysunek 5 przedstawia obszary nakładających się rozkładów sygnału od istniejących nieciągłości (TP) i szumu (TN), gdzie nie ma rzeczywistych nieciągłości, co powoduje osłabienie sygnału i wzrost możliwości zakwalifikowania źródeł sygnałów od fałszywych wskazań (FP), jak i niewykrycia rzeczywistej nieciągłości (FN).

W zależności od określonej czułości badania otrzymujemy różne przypadki wyników badania. Im bardziej na lewo przesunięty zostanie próg czułości badania, tym więcej istniejących nieciągłości może zostać wykrytych. FN ulegnie zmniejszeniu, ale równocześnie pojawi się więcej fałszywych wskazań od nieistniejących nieciągłości (FP), co jest zgodne z krzywą ROC (rys. 5).

NA PODSTAWIE KRZYWEJ ROC MOŻNA OCENIĆ WIARYGODNOŚĆ BADAŃ NIENISZCZĄCYCH.

Najczęściej stosowaną formułą wiarygodności jest wyrażenie:

$$R = POD (1 - PFI)$$

- Dążenie do uzyskania dużych wartości POD pociąga za sobą wzrost PFI(A). Takie podejście stosowane jest wtedy, gdy koszty badanego elementu są duże i **w związku z tym dążymy do niskiego ryzyka popełnienia błędu w badaniach**.
- Dążenie do małych wartości PFI(A) zwiększa prawdopodobieństwo odrzucenia części wyników spełniających wymagania. **Takie podejście jest uzasadnione, gdy możemy dopuścić wyższe ryzyko popełnienia błędu w badaniach ze względu na niewielkie koszty elementu**.
- Można przyjąć, że dla większości badań nieniszczących osiąga się POD na poziomie 60% [10].
- Na podstawie danych literaturowych [5] dotyczących wiarygodności badań nieniszczących można stwierdzić, że badania nieniszczące powinny być prowadzone tak, aby możliwe było uzyskanie POD = 90% z 95-procentowym poziomem ufności (NASA), tzn. powinniśmy wykrywać 45 nieciągłości z występujących w rzeczywistości 46 nieciągłości.

Jak to kryterium jest trudne do spełnienia, najlepiej ilustruje przykład wyników badań zorganizowanych przez Holenderski Instytut Spawalnictwa na próbkach obiegowych (Round Robin Testing, RRT). Badania przeprowadzono na złączach spawanych doczołowych o grubości 30–50 mm,

a następnie zweryfikowano ich wyniki badaniami niszczącymi. Okazało się, że ręczne badania ultradźwiękowe dały $POD = 52,3\%$, badania ultradźwiękowe zmechanizowane $POD = 83,6\%$.

PRZEDZIAŁ UFNOŚCI I POZIOM UFNOŚCI

PRZEDZIAŁ UFNOŚCI I POZIOM UFNOŚCI TO DWA WAŻNE TERMINY STATYSTYCZNE OPISUJĄCE DOKŁADNOŚĆ WYNIKÓW, ODZWIERCIEDLAJĄCE TŁO STATYSTYCZNE.

- **Przedział ufności** określa zakres, w którym z określonym prawdopodobieństwem znajduje się nieznaną wartość szacowanego parametru.
- **Poziom ufności** odzwierciedla prawdopodobieństwo, z jakim wartość szacowanego parametru znajduje się w przedziale ufności. W większości przypadków poziom ufności ustalany jest na 95%.

Przedział i poziom ufności są ze sobą skorelowane i określane przez kilka czynników.

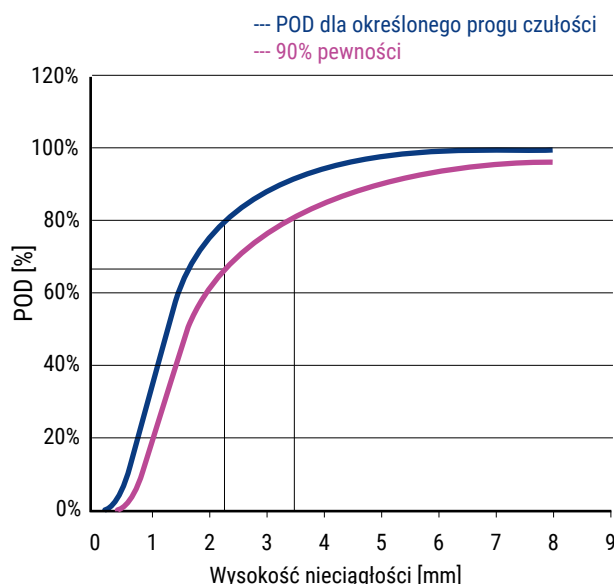
Im większy jest przedział ufności, tym:

- większe odchylenie standardowe,
- mniejszy poziom ufności.

JAK MOŻNA OPISAĆ POZIOM UFNOŚCI?

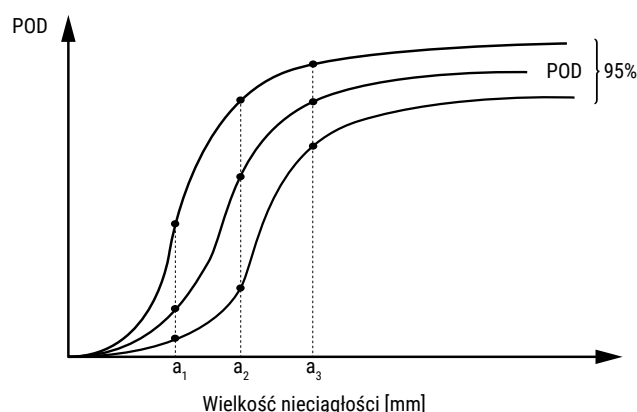
Dobrym sposobem opisanie krzywej ufności (np. 95%) jest poniższe stwierdzenie.

Jeżeli krzywa POD miałaby być rekonstruowana wielokrotnie przy użyciu tej samej metody i tych samych danych, wówczas 95% tych wyznaczonych krzywych byłoby powyżej krzywej ufności (tj. 5% byłoby poniżej). Innymi słowy, istnieje 95% pewności, że RZECZYWISTA krzywa POD znajduje się powyżej krzywej pewności.



Rys. 6. POD w odniesieniu do wysokości nieciągłości [3]

Rysunek 6 przedstawia krzywą POD, która wskazuje, że istnieje 80-procentowe prawdopodobieństwo wykrycia nieciągłości o wysokości 2,2 mm i możemy stwierdzić z 90-procentową pewnością, że nie byłaby ona większa niż 3,3 mm, lub odwrotnie: możemy również stwierdzić, że mamy 90% pewności, że nieciągłość o wysokości 2,2 mm zostanie wykryta, a poziom POD nie będzie mniejszy niż 65%.



Rys. 7. Krzywa POD z pasmem rozrzutu uwzględniającym poziom ufności 95%, z odniesieniem do nieciągłości o różnych wymiarach [4]

NOWOCZESNE METODY WYZNACZANIA KRZYWYCH POD [2,6]

POWSZECHNIE WIADOMO, ŻE KONTROLA ZA POMOCĄ NIENISZCZĄCYCH METOD I TECHNIK BADAŃ NIE JEST DOSKONAŁA I CZĘSTĄ PRAKTYKĄ STAŁO SIĘ ILOŚCIOWE OKREŚLANIE WIARYGODNOŚCI WYKRYWANIA NIECIĄGŁOŚCI UWZGLĘDNIĄJĄCEGO PRAWDOPODOBIEŃSTWO WYKRYCIA (POD) CZY PRAWDOPODOBIEŃSTWO FAŁSZYWEGO WSKAZANIA (PFI).

Eksperymentalne wyznaczanie tych parametrów jest kosztowne, a statystyki uzyskiwane w takim procesie ograniczone, dlatego w ostatnich latach zaczęto mocno wykorzystywać modelowanie matematyczne.

Obecnie dostępnych jest wiele modeli komputerowych, które są coraz częściej wykorzystywane do przewidywania POD i PFI.

Obejmują one coraz większy zakres metod i technik badawczych, wyniki symulacji otrzymuje się w czasie rzeczywistym na standardowych komputerach.

Szczególnie znaczący rozwój modeli symulacyjnych następuje w lotnictwie i kosmonautyce. Walidacje tych modeli pozwalają na stwierdzenie, że można uzyskać prognozy POD, które są porównywalne z krzywymi uzyskanymi w próbach eksperymetalnych.

JAKIE KORZYŚCI PRZYNOSI MODELOWANIE POD?

1. Zaletą korzystania z modeli jest to, że wyniki można uzyskać stosunkowo łatwo i niewielkim kosztem. Zazwyczaj wykonuje się model, w którym zmienia się parametry badania, takie jak np.: szybkość skanowania, orientację nieciągłości, ustawienie progu, w celu uzyskania spójnych szacunków ich wpływu na POD i PFI. Pozwala to w konsekwencji na optymalizację badań pod kątem kosztów i korzyści.
2. Drugą bardzo ważną zaletą obliczeń modelowych jest to, że istnieje bardzo mało danych eksperymetalnych dotyczących fałszywych wezwań PFI, a model jest dla nich zwykle jedynym źródłem danych.
3. Modelowanie umożliwia również ocenę danych historycznych, optymalizację na etapie projektowania oraz pozwala na rozszerzenie danych eksperymetalnych na nowe zastosowania.
4. Biorąc pod uwagę ograniczone statystyki i duży rozrzut

w eksperymentalnych próbach wyznaczania POD, można dyskutować, czy zapewniają one dokładniejsze wartości niż podejście oparte na modelowaniu lub symulacji.

MODELE SYGNAŁ/SZUM

Konwertują wartości sygnału i szumu na POD i PFI przy użyciu metod statystycznych. Wartości sygnału i szumu można wyprowadzić z modeli lub eksperymentu, np. z pomiarów na próbkach z nieciągłościami referencyjnymi.

Podejście do obliczania POD jest podobne do fizycznych modeli eksperymentalnych. Ta metoda pozwala uniknąć trudności statystycznych związanych z konwencjonalnymi próbami POD i umożliwia przewidywanie POD dla nowych technik badań, które mogą być zbyt złożone, aby można je modelować fizycznie.

W przypadku takiego modelu można przyjąć podejście modułowe, z danymi wejściowymi do modelu POD pochodzącymi z modelu fizycznego lub eksperymentu.

MODELE KLASYFIKACJI OBRAZU / SYMULATORY BADANIA („VISUAL” POD)

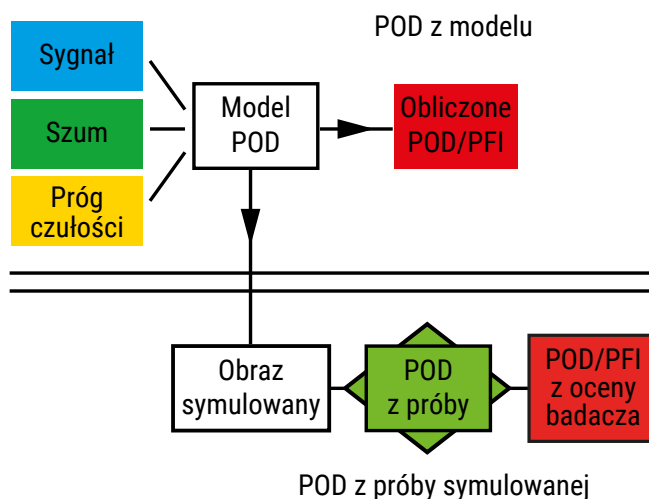
Reprezentują one metody analizy danych z badań obrazowych, takich jak radiogramy, w celu uzyskania informacji dotyczących POD i PFI.

Symulatory takich badań są zaliczane do specjalnej klasy modeli komputerowych symulujących proces badania poprzez prezentację symulowanych wyników badania (radiogramów) operatorowi.

Pionierem opartego na sieciach neuronowych podejścia do wykrywania nieciągłości w technikach obrazowych, stosowanych w modelu radiograficznym NNXPOSE, wykorzystującego wrażliwe pola do wyszukiwania i oceny określonych typów nieciągłości, takich jak pęknięcia, porowatość lub wtrącenia żużla i dokładniej odtwarzającego ludzkie umiejętności interpretacyjne badacza, był **Colin Windsor** [2,7].

- Interpretacja danych opartych na obrazie jest bardziej subtelna i wymaga bardziej złożonych kryteriów detekcji niż analiza danych sygnał/szum.
- Kryterium detekcji może być po prostu przekroczenie progowego poziomu sygnału w wielu miejscach, na określonej liczbie pikseli, na określonym obszarze lub bardziej zbliżone do rzeczywistego działania systemu badawczego.
- Tworzenie symulowanych obrazów i danych kontrolnych w odpowiedni sposób jest ważne. Obrazy powinny dawać pewność, że symulacja i szacunki POD będą wiarygodne.

Program dokonuje obliczeń POD i PFI i równolegle przedstawia do oceny badaczowi serię symulowanych obrazów („Visual POD, PFI”), zawierających nieciągłości (rys. 8) – POD i PFI są obliczane automatycznie.



Rys. 8. Schemat przedstawiający model POD z wykorzystaniem symulowanych obrazów do wyznaczania POD, z modułem walidacji przewidywań modelu („Visual POD”) [2, 9]

Takie rozwiązanie zapewnia drugą niezależną metodę oszacowania POD przez model, a porównanie „Obliczone POD/PFI” oraz „POD/PFI z oceny badacza” dostarcza informacji na temat **niezawodności człowieka**.

OCENA EKSPERTA

Ocena eksperta jest wykorzystywana tam, gdzie dane wejściowe do POD są wymagane do mechaniki pęknięcia lub ocen opartych na ryzyku i nie są dostępne z eksperymentu.

Jest to skuteczna metoda pod warunkiem, że ocena pochodzi od dobrze wyszkolonych, doświadczonych badaczy i stosowana jest analiza wrażliwości.

MODELE WIZUALIZACJI 3D POŁĄCZONE Z CAD

Szereg modeli symulacyjnych współpracuje z pakietami CAD w celu umożliwienia trójwymiarowej wizualizacji procesu badawczego złożonych komponentów.

Wirtualna sonda może być przesuwana za pomocą myszy, a dane z badania są przeliczane w czasie rzeczywistym. Już pod koniec lat 90. XX w. w Iowa State University zaadaptowano symulator ultradźwiękowy oparty na CAD, aby uzyskać trójwymiarową symulację badań UT oraz wykresy POD [8].

MODELE STATYSTYCZNE

Wykorzystują metody analizy statystycznej lub dopasowywania krzywych do danych eksperymentalnych w celu udostępnienia tych danych do wykorzystania w innych zastosowaniach (takich jak mechanika pęknięcia). Nie modelują one procesu badania jako takiego.

MODELE NIEZAWODNOŚCI CZŁOWIEKA

Uwzględniają wpływ błędów ludzkiego w procesie kontroli i korygują pod tym względem przewidywane wartości POD. Dane eksperymentalne są gromadzone w wielu dziedzinach, w tym w NDT [9].

Czynnik ludzki i czynniki środowiskowe są skomplikowane i trudne do modelowania.

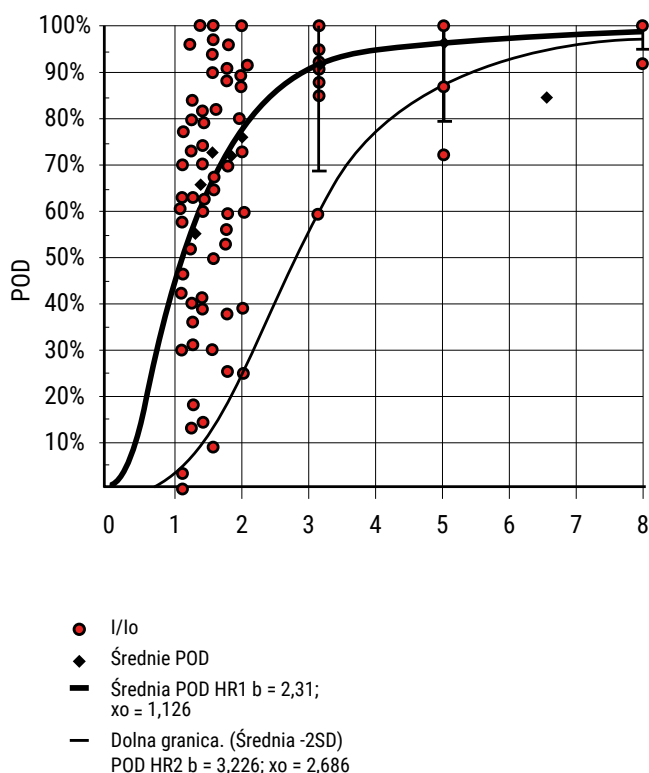
Powszechnie wiadomo, że czynnik ludzki jest bardzo ważny i zależy od wielu zmiennych, takich jak zmęczenie, środowisko, stres i złożoność zadania. Różniamy zadania badawcze obejmujące „wzrok” i „koordynację wzrokowo-ruchową”.

Przykładem może być metodologia zastosowana przez firmę AEA Technology, która wykorzystuje dane o błędach ludzkich z pracy PISC III i innych źródeł do korygowania przewidywań modelu [10].

Aby zapewnić, że przewidywania modelu będą porównywalne z tymi, które można uzyskać w próbach eksperymentalnych, wykorzystuje się współczynnik H (czynnik ludzki).

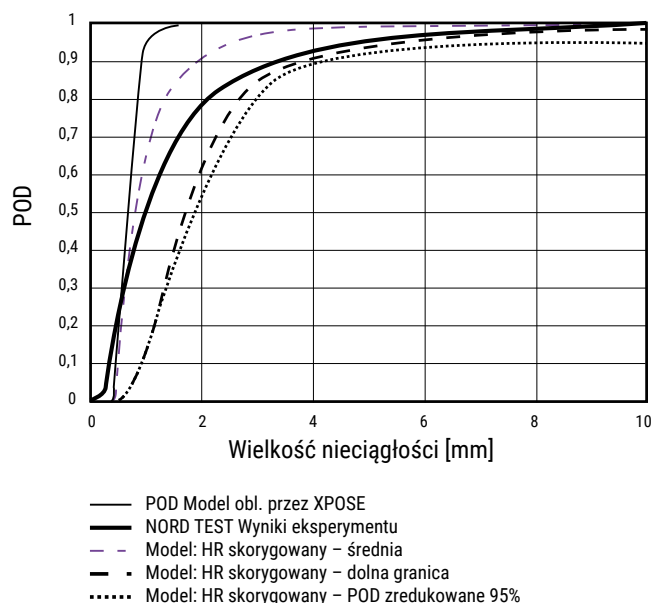
$$POD_{actual} = POD_{model} * H$$

Korekcja polega zazwyczaj na wykorzystaniu stałego współczynnika redukcji POD, zazwyczaj 95% lub mniej w trudniejszych warunkach. Dokładniejszą metodą korekcji jest wykorzystanie krzywych, takich jak dane dotyczące błędu ludzkiego wyrażone jako POD na rys. 9, pochodzące z danych PISC III Programme [9]. Wykres pokazuje, że skutki błędu ludzkiego są większe w przypadku małych nieciągłości bliskich wartości progowej. **W tym przypadku błąd ludzki POD jest używany jako współczynnik H.** Wartości korekcji błędu ludzkiego zostały również wyprowadzone przez porównanie danych z symulacyjnych prób modelowych (visual POD/PFI) z danymi eksperymentalnymi lub z porównania prób terenowych i laboratoryjnych.



Rys. 9. Krzywe POD dla niezawodności człowieka wyprowadzone z danych eksperymentów w PISC III przy użyciu ultradźwiękowego symulatora AEA Technology PCSIMONE (I/Io to sygnał (I) podzielony przez próg czułości Io) [9]

Przykład pokazujący poprawkę POD na błąd ludzki modelu wykonanego dla badań radiograficznych przedstawiono na rysunku 10. Można zaobserwować, że przy uwzględnieniu współczynnika H zgodność modelowych POD z eksperymentalnymi POD polepsza się.



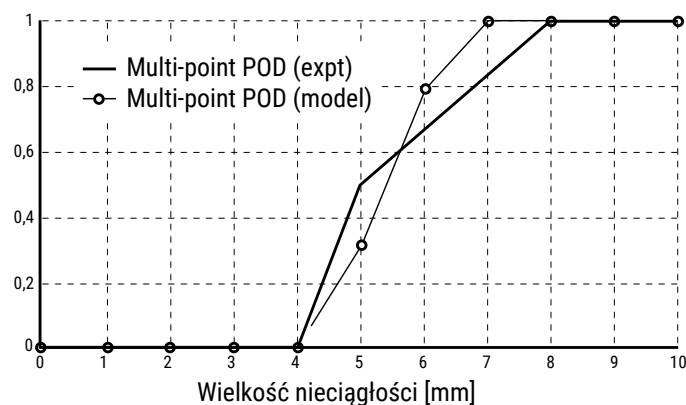
Rys. 10. Przykład pokazujący korekcję modelowej krzywej POD dla błęd ludzkiego (HR) i porównanie z eksperymentalnymi danymi NORDTEST POD (korekta przy użyciu średniej i dolnej granicy krzywych niezawodności człowieka przedstawionej na rysunku 9 – radiografia 25 mm blachy stalowej) [9]

WALIDACJA

WALIDACJA MODELI JEST WAŻNA DLA UZYSKANIA WIĘKSZEJ AKCEPTACJI DLA ICH WYKORZYSTANIA. MODELE POD SĄ OPARTE NA FIZYCZNYCH MODELACH DO KONTROLI ULTRADŹWIKOWEJ I RADIOGRAFIKOWEJ, KTÓRE ZOSTAŁY SPRAWDZONE I ZWERYFIKOWANE PRZEZ WIELE LAT.

Aby zweryfikować istniejące modele POD, stosowane są następujące podejścia:

- porównanie z eksperymentalnymi danymi POD (rys. 11),
- porównanie symulowanych obrazów z rzeczywistymi obrazami,
- używanie symulowanych obrazów w próbach POD („Visual POD PFI”).



Rys. 11. Walidacja modelu – porównanie modelowych i eksperymentalnych krzywych POD dla ultradźwiękowej kontroli C-Scan pod kątem rozwarstwienia w płycie CFRP (Carbon fiber reinforced polymer) [9]

ZASTOSOWANIA MODELI POD

Modele POD mają zastosowanie we wszystkich obszarach, w których obecnie wykorzystywane są eksperymentalne dane NDT dotyczące niezawodności, m.in.:

- walidacja badania,
- porównywanie technik badania,
- wkład do przypadków dotyczących analiz bezpieczeństwa (np. ubezpieczyciele),
- ocena ekonomiczna,
- wkład do oceny mechaniki pęknięcia i oceny integralności konstrukcji,
- przewidywanie rozkładu nieciągłości,
- optymalizacja wydajności i procedur kontroli,
- pomoc we wprowadzaniu nowej technologii.

Istnieje kilka zastosowań, w których modelowanie jest jedynym możliwym podejściem:

- badania parametryczne i analiza wrażliwości,
 - ocena historycznych danych z badania (np. na podstawie wyników okresowych badań instalacji),
 - ekstrapolacja i interpolacja danych eksperymentalnych,
 - optymalizacja badania na etapie projektowania,
 - próby POD z wykorzystaniem symulowanych danych z rzeczywistych badań,
 - pomoc w projektowaniu i wspieraniu eksperymentalnych prób POD.
- Obecnie modele POD są używane we wszystkich możliwych zastosowaniach, a podejście to jest niezwykle cenne we wspieraniu przypadków dotyczących analiz bezpieczeństwa i walidacji badań.

KORZYŚCI I WYKORZYSTANIE MODELI

Komputerowe modelowanie niezawodności badań stanowi najlepszą drogę do oceny nieniszczących metod i technik badawczych. Jest szybkim i ekonomicznie opłacalnym uzupełnieniem lub alternatywą dla metod eksperymentalnych. Trudność komputerowego modelowania polega głównie na tym, że nie jest łatwo ocenić pewność eksperymentu, ponieważ trudno jest wyizolować skutki czynników ludzkich i środowiskowych.

Obecnie dostępnych jest wiele modeli komputerowych do przewidywania wiarygodności badań pod względem prawdopodobieństwa wykrycia (POD) i fałszywych wskazań (PFI). Obejmują one coraz więcej metod/technik badań i działają na standardowych komputerach. Modele są wykorzystywane i weryfikowane oraz łączone w ramach podejścia modułowego z innymi modelami badań nieniszczących i symulacji badań. Metody korygowania przewidywań modelu rozwijają się również pod kątem błędu ludzkiego. Podstawowe znaczenie będzie miał rozwój sztucznej inteligencji.

Podejście modelowe zapewnia dodatkowe dane do ocen eksperymentalnych i pozwala na szersze wykorzystanie istniejących danych eksperymentalnych. Modele mogą dostarczyć konkretnych danych niedostęp-

nych z pomiarów eksperymentalnych, takich jak badania parametryczne, ocena danych historycznych i optymalizacja na etapie projektowania. Inne zastosowania obejmują także walidację i kwalifikację badań.

Modele niezawodności są wykorzystywane w ocenach ekonomicznych, dla szacowania populacji błędów, w celu wspierania analiz bezpieczeństwa oraz walidacji procedur i planów badań. Jeżeli stosuje się odpowiednie współczynniki korekcyjne wynikające z badań empirycznych, dotyczących wpływu błędów ludzkich i środowiskowych, wartości POD uzyskiwane za pomocą modelowania są zbliżone z wartościami uzyskiwanymi w badaniach eksperymentalnych.

Modele komputerowe są ściśle powiązane z eksperymentalnymi próbami POD. Ich stosowanie wpływa na zmniejszenie liczby wymaganych fizycznych próbek badawczych. Eksperymentalne próby mają najlepsze odniesienie do rzeczywistości, ale są kosztowne i czasochłonne oraz zazwyczaj mają statystyki obciążone dużą niepewnością z powodu rozproszenia wyników badań branych pod uwagę.

Od wielu lat prowadzone są prace badawcze związane z POD. Istnieje potrzeba opracowania indywidualnych modeli dla konkretnych zastosowań i dziedzin przemysłu oraz rozwoju walidacji. Bez wsparcia ze strony przemysłu nie będzie to możliwe.

WYMAGANIA

PODEJŚCIE STOSOWANE W LABORATORIACH BADAWCZYCH

WYMAGANIA DOTYCZĄCE NIEPEWNOŚCI, ZASAD PODEJMOWANIA DECYZJI WYNIKAJĄCYCH BEZPOŚREDNIO Z NORMY PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 [11] ORAZ MOŻLIWE ŹRÓDŁA NIEPEWNOŚCI I WALIDACJA.

WYMAGANIA PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 – NIEPEWNOŚĆ POMIARU

Zagadnieniom niepewności pomiaru poświęcony jest punkt 7.6 w PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 [11].

UWAGA

W przypadku gdy niepewność wyników pomiaru została ustanowiona i zweryfikowana dla KONKRETNEJ METODY, nie jest konieczna ocena niepewności pomiaru dla każdego uzyskiwanego wyniku przy zastosowaniu tej metody, jeżeli laboratorium może wykazać, że zidentyfikowane krytyczne czynniki wpływające są KONTROLOWANE.

● 7.6.1 Laboratorium powinno identyfikować składowe niepewności pomiaru. Przy ocenie niepewności pomiaru należy wziąć pod uwagę **WSZYSTKIE ISTOTNE SKŁADOWE**, w tym wynikające z pobierania próbek, stosując odpowiednie metody analizy.

● 7.6.3 Laboratorium, które wykonuje badania, powinno oceniać niepewność pomiaru. W przypadku gdy metoda badawcza wyklucza ścisłą ocenę niepewności pomiaru, szacowanie powinno być oparte na wiedzy o zasadach teoretycznych lub praktycznym doświadczeniu w realizacji metody.

WYMAGANIA PN-EN ISO/IEC 17025 – ZASADY PODEJMOWANIA DECYZJI

Z wynikiem badania związana jest ocena spełnienia wymagań określonych norm, specyfikacji.

Norma [11] wymaga od laboratorium planowania i wdrożenia działań odnoszących się do ryzyk i szans.

Uwzględnienie zarówno ryzyk, jak i szans stanowi podstawę do zwiększenia skuteczności systemu zarządzania, poprawy wyników oraz zapobiegania negatywnym efektom.

LABORATORIUM JEST ODPOWIEDZIALNE ZA PODEJMOWANIE DECYZJI, KTÓRE RYZYKA I SZANSE NALEŻY UWZGLĘDNIĆ.

● Punkt 3.7: zasada podejmowania decyzji jest zdefiniowana jako „zasada opisująca, w jaki sposób niepewność pomiaru jest uwzględniana przy określaniu zgodności z wyspecyfikowanym wymaganiem”.

● Punkt 6.2.6 zawiera wymaganie, aby laboratorium upoważniło personel do wykonywania „analizy wyników, w tym stwierdzania zgodności lub wydawania opinii i interpretacji”.

● Zgodnie z punktem 7.1.3 „W przypadku, gdy **KLIENT WYMAGA STWIERDZENIA ZGODNOŚCI** ze specyfikacją lub wymaganiem dotyczącym badania lub wzorcowania (np. spełnia/nie spełnia, w granicach tolerancji/poza granicami tolerancji), **SPECYFIKACJA LUB WYMAGANIE ORAZ ZASADA PODEJMOWANIA DECYZJI POWINNY BYĆ JASNO OKREŚLONE**.”

Jeżeli nie jest to zawarte w specyfikacji lub wymaganiu, wybrana zasada podejmowania decyzji powinna być zakomunikowana klientowi i z nim uzgodniona”.

● Punkt 7.8.6.1 stanowi:

„Gdy przedstawiane jest stwierdzenie zgodności ze specyfikacją lub wymaganiem dotyczącym badania lub wzorcowania, laboratorium powinno **UDOKUMENTOWAĆ PRZYJĘTĄ ZASADĘ** podejmowania decyzji, biorąc pod uwagę poziom ryzyka związanego z przyjętą zasadą (takiego jak **BŁĘDNA AKCEPTACJA I BŁĘDNE ODRZUCENIE** oraz założenia statystyczne) i zastosować zasadę podejmowania decyzji”.

● W punkcie 7.8.6.2 sformułowano wymaganie: „laboratorium powinno przedstawić stwierdzenie zgodności w taki sposób, aby stwierdzenie jasno identyfikowało:

- do których wyników odnosi się stwierdzenie zgodności
- które specyfikacje, normy lub ich części są spełnione, a które nie
- zastosowaną zasadę podejmowania decyzji (o ile nie jest ona właściwie określona we wskazanej specyfikacji lub normie)”.

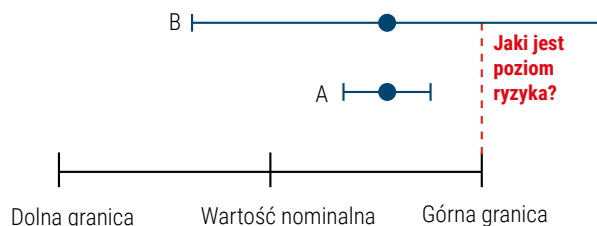
NIEPEWNOŚĆ POMIARU I RYZYKA ZWIĄZANA Z DECYZJĄ

Przy wykonywaniu pomiaru, a następnie przedstawianiu stwierdzenia zgodności, np. w granicach lub poza granicami tolerancji w odniesieniu do specyfikacji producenta oraz spełnia lub nie spełnia w przypadku określonego wymagania, możliwe są dwa wyniki:

● podjęcie **prawidłowej decyzji dotyczącej zgodności ze specyfikacją (przypadek A)**,

● podjęcie błędnej decyzji dotyczącej zgodności ze specyfikacją (**przypadek B**).

Rozszerzona niepewność pomiaru dolnego wyniku (przypadek A) mieści się całkowicie w granicach tolerancji. Górny wynik (przypadek B) ma znacznie większą niepewność pomiaru. Ryzyko błędnej akceptacji wyniku w przypadku B jest wyższe ze względu na większą niepewność pomiaru (patrz „Jaki jest poziom ryzyka” – rys. 1).



Rys. 1. Ilustracja ryzyka związanego z decyzją dotyczącą pomiaru

W przypadku laboratoriów NDT, w których charakter stosowanych metod badawczych zazwyczaj uniemożliwia ścisłe obliczenie niepewności wyniku badania, pozostaje **ROZPOZNANIE WSZYSTKICH ŹRÓDEŁ NIEPEWNOŚCI I RACJONALNE ICH OSZACOWANIE**, wykorzystujące **DANE O MOŻLIWOŚCIACH METODY CZY TECHNIKI** NDT, doświadczenie związane z jej stosowaniem w praktyce, **DANE Z BADAŃ BIEGŁOŚCI** oraz dane z **WALIDACJI METODY**.

ŹRÓDŁA NIEPEWNOŚCI – BUDŻET

Trudności przy szacowaniu niepewności badań, które występują w laboratoriach NDT, są związane z jednej strony z przekonaniem o bardzo wysokiej wiarygodności badań nieniszczących, a z drugiej strony z tendencją do drobiazgowego obliczania niepewności cząstkowych.

BADANIA NIENISZCZĄCE, WYKORZYSTUJĄCE RÓŻNE ZJAWISKA FIZYCZNE CZY FIZYKOCHEMICZNE, SĄ ZRÓŻNICOWANE POD WZGLĘDEM ŹRÓDEŁ WYSTĘPUJĄCYCH W BUDŻECIE NIEPEWNOŚCI.

Źródła niepewności występujące we wszystkich metodach i technikach NDT można przedstawić jako:	Badania defektoskopowe obejmują często kilka kolejno po sobie stosowanych metod badania, dla których ustalenie kolejności w procesie badawczym nie jest obojętne.
● plan badań, ● procedura, ● instrukcja, ● wybór obszarów badań, ● przygotowanie obiektu do badań, ● stosowne WPB, ● czynnik ludzki, ● miejsce i warunki badań, ● kwalifikacje personelu badawczego.	
Należy tak ustalić kolejność badań, aby nie wpływały one wzajemnie na siebie.	

Przygotowanie obiektu do badań defektoskopowych może obejmować takie zagadnienia, jak:

- studzenie,
- demontaż izolacji,
- demontaż urządzenia,
- oczyszczenie powierzchni badanej z uwzględnieniem rodzaju obróbki stosowanej do czyszczenia.

Aby obliczyć prawdopodobieństwo wykrycia nieciągłości przy zastosowaniu „n” metod lub technik badawczych charakteryzujących się prawdopodobieństwem POD_i , można skorzystać z **WZORU VON NEUMANA**.

Otrzymujemy wyrażenie na całkowite prawdopodobieństwo wykrycia nieciągłości.

$$POD_w = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - POD_i)$$

Badając obiekt trzema metodami (lub technikami) NDT, przy:
POD1 = 40%,
POD2 = 65%
POD3 = 65%
otrzymujemy $POD_w = 92,65\%$.

Wynik pokazuje celowość prowadzenia badań kompleksowych z wykorzystaniem kilku metod badawczych, mimo że wiąże się to ze wzrostem kosztów badań.

Niepewności można ogólnie podzielić na dwie kategorie:

- niepewność wykrywania,
- niepewność wymiarowania.

W badaniach nieniszczących wymaga się, aby oprócz wyników jakościowych uzyskiwano wyniki ilościowe.

WYBÓR OBSZARÓW DO BADAŃ, MIEJSCE I WARUNKI BADAŃ

Zagadnienie wyboru obszarów badań dotyczy głównie badań eksploatacyjnych, w przypadku których muszą zostać wybrane obszary najbardziej narażone, wyęteżone, w których procesy degradacji oddziałują najsilniej.

Obszar badań zazwyczaj nie obejmuje całej powierzchni obiektu, a diagnozę dla urządzenia stawia się na podstawie wyników badań uzyskanych w wybranych obszarach.

Należy zdawać sobie sprawę z faktu, że badania prowadzone w terenie są zawsze obarczone większą niepewnością niż badania prowadzone w laboratorium.

Niepewność badań rośnie wraz z pogarszaniem się warunków, w których są przeprowadzane.

PARAMETRY I PRZEBIEG BADAŃ

Dobór parametrów badania zależy od:

- ustalonego poziomu badania,
- zastosowanej metody/techniki badania,
- wyposażenia,
- stosowanych materiałów,
- materiałów odniesienia.

Procedury i instrukcje badawcze ustalają zasady doboru sond, głowic, materiałów, parametrów badania, liczby przeszukiwań na podstawie norm, przepisów oraz wiedzy i doświadczenia.

WYPOSAŻENIE BADAWCZE, MATERIAŁY

Bez względu na metodę, technikę badania czy materiały elementów badanych korzystanie z próbek odniesienia wykonanych z tych samych materiałów, o podobnej geometrii, przy zastosowaniu tej samej technologii co badany element, powinno być wymagane wszędzie tam, gdzie jest to możliwe, szczególnie w badaniach diagnostycznych urządzeń eksploatowanych.

Jednym ze źródeł niepewności badań jest WPB:

- aparatura badawcza, głowice, sondy, wzorce, próbki odniesienia,
- różnorodność wyposażenia, jego stopień komplikacji, specyfika oprogramowania, stanu technicznego, okres eksploatacji,
- szacowanie niepewności wynikające z tego faktu jest trudne i musi być, oparte na wiedzy dotyczącej WPB oraz kompetencji personelu.

Normy dotyczące sprawdzenia defektoskopów przywołują podstawowe wzorce do sprawdzenia i skalowania aparatury.

PERSONEL BADAWCZY

W NDT mamy do czynienia z dwoma etapami, tj. procesem badania oraz procesem oceny wyniku badania.

Oba etapy są niezwykle mocno zależne od czynnika ludzkiego stanowiącego największe źródło niepewności tych badań.

Wynik badania i jego ocena zależą od kompetencji operatora (oceniającego), jego wykształcenia, wyszkolenia i doświadczenia – potwierdzenie kompetencji (certyfikacja).

Na wynik badania wpływają również: stan zdrowia badacza, jego predyspozycje psychofizyczne, atmosfera w laboratorium, tempo badań, warunki badań, zmęczenie.



Tabela 1. Czynniki mające wpływ na wynik badania

1. cechy konstrukcyjne obiektu 2. charakterystyka środowiska 3. temperatura 4. wilgotność 5. jakość powietrza 6. oświetlenie 7. odgłosy 8. wibracje 9. stopień ogólnej czystości 10. godziny pracy czas pracy/odpoczynku 11. dostępność do sprzętu przydatność 12. organizacja zmian liczba inspektorów 13. struktura instytucji uprawnienia obowiązki kanały komunikacji 14. działania przełożonych współpracowników 15. nagrody podziękowania zachęty 16. wymagania dla ruchów szybkość wytrzymałość precyzja 17. warunki sterowania lub wyświetlania	18. potrzeby w zakresie tłumaczeń 19. potrzeby decyzji 20. powtarzanie monotonia 21. złożoność zadań 22. potrzeba pamięci krótkotrwałej i długotrwałej 23. konieczność wykonania obliczeń 24. informacja zwrotna z wyników 25. komunikacja i struktura zespołu roboczego 26. czynniki interfejsu człowiek-maszyna 27. projekt zespół 28. narzędzia 29. wymagania dotyczące stosowania pisemnych procedur 30. komunikacja ustna i pisemna	31. metody pracy 32. zasady zarządzania 33. wcześniejsze doświadczenie i przygotowania 34. obecna praktyka w szkoleniu 35. cechy osobiste 36. motywacja nastawienie 37. stan emocjonalny 38. postawy oparte na wpływach rodzinnych i innych czynnikach 39. praca w grupie roboczej 40. nagle pojawienie się przychyny psychologicznej 41. czas trwania napięcia psychicznego 42. natężenie pracy 43. obciążenie pracą 44. ryzyko w pracy 45. strach przed porażką przegraną 46. monotonia pracy 47. długie okresy pracy bez zdarzeń	48. rozpraszanie (z powodu hałasu i innych czynników) 49. czas trwania fizjologicznego napięcia 50. zmęczenie 51. dyskomfort i ból 52. głód i pragnienie 53. temperatura 54. promieniowanie 55. ekstremalne przyspieszenia 56. trudność w wykonywaniu ruchów 57. niedobór tlenu 58. ekstremalne ciśnienie atmosferyczne 59. brak wysiłku fizycznego
---	--	---	--

WALIDACJA

Walidacja metod lub technik NDT jest ściśle związana z niepewnością badania, której nie można oszacować bez znajomości przebiegu krzywych POD dla danej metody i dla danego rodzaju nieciągłości.

Badania doświadczalne wskazują, że dla wszystkich metod NDT kształt krzywych POD jest podobny, natomiast inne może być ich położenie na wykresie. Prawdopodobieństwo wykrycia nieciągłości o danym rozmiarze zależy nie tylko od metody czy techniki NDT, ale również od jej rodzaju, położenia, usytuowania względem np. osi wiązki ultradźwiękowej, wiązki promieniowania czy linii sił pola magnetycznego.

OBLICZANIE NIEPEWNOŚCI NA PODSTAWIE SZACOWANIA WPŁYWU POSZCZEGÓLNYCH SKŁADOWYCH ŹRÓDEŁ NIEPEWNOŚCI u_i

Punkt 7.6.1 normy PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 podaje, że „Laboratorium powinno identyfikować składowe niepewności pomiaru. Przy ocenie niepewności pomiaru należy wziąć pod uwagę wszystkie istotne składowe, w tym wynikające z pobierania próbek, stosując odpowiednie metody analizy”.

7.6.3 Laboratorium, które wykonuje badania, powinno oceniać niepewność pomiaru. W przypadku gdy metoda badawcza wyklucza ścisłą ocenę niepewności pomiaru, szacowanie powinno być oparte na wiedzy o zasadach teoretycznych lub praktycznym doświadczeniu w realizacji metody.

Wartości u_i ustalone są na podstawie wiedzy o możliwościach i ograniczeniach danej metody czy techniki NDT, danych z walidacji, znajomości warunków badań, stanu wyposażenia, kwalifikacji personelu.

Przy ustalaniu budżetów niepewności należy uwzględniać źródła niepewności charakterystyczne dla danej metody (techniki).

WARUNKI WSTĘPNE DLA OKREŚLENIA BUDŻETU NIEPEWNOŚCI

Ustalenie budżetu niepewności jest możliwe w przypadku, gdy właściwie określone i znane są:

- zadanie badawcze,
- cechy charakterystyczne badanego elementu,
- metoda/technika badania,
- procedura badawcza/pomiarowa – właściwie udokumentowana (procedura powinna zawierać wymagania dotyczące specyfikacji badań i oceny, wyboru wyposażenia pomiarowego (badawczego) oraz podawać wszystkie szczegóły dotyczące sprawdzania, skalowania wyposażenia badawczego, stanu obiektu w czasie badań),
- warunki badania.

PODSUMOWANIE

WAŻNE

JAK DUŻE LUB MAŁE NIECIĄGŁOŚCI MOŻNA WYKRYWAĆ?
DO JAKIEGO RODZAJU NIECIĄGŁOŚCI, Z UWZGLĘDNIENIEM
ICH USYTUOWANIA, MA ZASTOSOWANIE
METODA (TECHNIKA) BADAWCZA?

Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 każde laboratorium badawcze powinno ustalić niepewność badań dla każdej metody oraz techniki badań.

Badania nieniszczące są kluczowymi i często jedynymi mającymi zastosowanie metodami w diagnostyce urządzeń technicznych.

Przeprowadzając badania nieniszczące, dokonujemy oceny nieciągłości na podstawie wymagań norm lub specyfikacji technicznych. Na podstawie oceny podejmowana jest decyzja, czy badany element spełnia wymagania.

Często zastanawiamy się, jakie wymiary ma najmniejsza wykrywana nieciągłość, ale znacznie ważniejsza, a właściwie krytyczna jest informacja, JAKA JEST NAJWIĘKSZA NIECIĄGŁOŚĆ, KTÓRĄ MOŻNA PRZEOCZYĆ, STOSUJĄC TECHNIKĘ BADAŃ NIENISZCZĄCYCH.

Aby być pewnym wyników badań, należy przeprowadzić analizę statystyczną wiarygodności.

Należy ustalić możliwość i prawdopodobieństwo wykrycia nieciągłości o różnych wymiarach, nasileniu, położeniu w rzeczywistych warunkach badawczych na podstawie prawdopodobieństwa wykrycia POD i możliwości wystąpienia fałszywych wskazań PFI(A) oraz własnego doświadczenia.

Eksperymentalne metody wyznaczania krzywych POD są bardzo kosztowne, czasochłonne, wymagają dużej liczby próbek ze znanymi nieciągłościami aby umożliwić prawidłowe oszacowanie statystyczne krzywych POD i ich przedziały ufności.

Podczas planowania badań laboratorium należy:

- zdefiniować optymalny próg wykrywania nieciągłości dla używanego systemu lub systemów badawczych,
- określić konsekwencje złych decyzji,
- uwzględnić wszystkie informacje dotyczące metod, technik badawczych,
- w przypadku badań diagnostycznych uwzględnić możliwe mechanizmy degradacji.

Ogólnie można stwierdzić, że:

- czynnik ludzki jest przyczyną większości niepowodzeń w wykrywaniu nieciągłości; nawet dobrze wykwalifikowani i doświadczeni badacze popełniają błędy;
- z uwagi na prawie całkowitą eliminację czynnika ludzkiego automatyczne techniki inspekcji pozwalają na znacznie większe prawdopodobieństwo wykrycia niż techniki „ręczne” oraz znacznie większą odtwarzalność i powtarzalność badań;
- należy jednak zauważyć, że badania automatyczne często są ekonomicznie i technicznie niewykonalne.

KONKLUZJA KOŃCOWA

Wyniki badań nieniszczących, szczególnie prowadzonych w ramach badań diagnostycznych urządzeń technicznych i ich elementów, są brane pod uwagę przy prognozowaniu ich dalszej przydatności do eksploatacji.

Na podstawie wyników badań podejmowane są decyzje o dopuszczeniu lub niedopuszczeniu do ruchu urządzeń technicznych mogących stwarzać różnego rodzaju zagrożenia dla życia, zdrowia, środowiska i mienia, dlatego tak istotne jest prawidłowe określenie niepewności pomiarowej.



Literatura:

1. Welcome to the Wiki of the Chair of Non-destructive Testing, Probability of detection (POD), <https://collab.dvb.bayern/pages/viewpage.action?pageId=70096904> [dostęp: 09.2024]
2. M. Wall, F. A. Wedgwood, S. Burch. Modelling of NDT Reliability (POD) and applying corrections for human factors. AEA Technology plc, National NDT Centre, Culham Science Centre, Abingdon, OX14 3DB United Kingdom
3. Introduction to the Statistics of NDTE. Ginzel - Materials Research Institute
4. Nondestructive Testing Methods and New Applications, Edited by Mohammed Omar
5. Ward D. RUMMEL, D & W Enterprises, Ltd., 8776 W. Mountainview Lane, Littleton, Colorado 80125, USA. A Path Forward for NDE Reliability. 5th European-American Workshop on Reliability of NDE – Lecture 1. DGZfP
6. Wall M: Modelling of Inspection Reliability, Engineering Science and Education Journal, Vol. 6 No. 2 pp63-72 April 1997
7. Schmerr L. W.: Modelling and Simulation of NDE Inspections, Review of progress in Quantitative Nondestructive Evaluation QNDE18, Vol 18, pp 679-694, Ed. Thompson and Chimenti, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999
8. R. A. Murgatroyd et al: Human Reliability in Inspection: Results of Action 7 of PISC III Programme, 1994
9. M. Wall, F. A. Wedgwood, S. Burch: Modelling of NDT Reliability (POD) and applying corrections for human factors, ECNDT7 Paper 439, Proceedings 7th European Conference on NDT (ECNDT), Copenhagen, 26-29 May 1998
10. POD/POS curves for non-destructive examination. Offshore technology report 2000/018. Prepared by Visser Consultancy Limited for the Health and Safety Executive
11. PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 - Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących
12. ILAC-G8.09/2019 - Wytyczne dotyczące zasad podejmowania decyzji i stwierdzeń zgodności
13. ILAC-G17.01/2021 - Wytyczne ILAC dotyczące niepewności pomiaru w badaniach