

Paweł Grześkowiak\*

Dział Badań Laboratoryjnych Urząd Dozoru Technicznego, Oddział w Poznaniu, Pawel.Grzeskowiak@udt.gov.pl

# Niepewność i wiarygodność badań nieniszczących, Część 1. Krzywe POD

## UNCERTAINTY AND RELIABILITY OF NON-DESTRUCTIVE TESTING, PART 1. POD

### STRESZCZENIE

Wykonując badania, powinniśmy zastanowić się nad ich wiarygodnością oraz określić w jakim stopniu dana metoda czy technika badań nieniszczących spełnia założone cele i oczekiwania wobec badania. 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. W pierwszej części artykułu starano się przybliżyć zagadnienie wyznaczania krzywych POD (prawdopodobieństwo wykrycia), przedstawiających w sposób ilościowy prawdopodobieństwo wykrywania nieciągłości w badaniach nieniszczących. W drugiej części artykułu skupiono się na podejściu praktycznym stosowanym w laboratoriach badawczych wynikającym z wymagań normy PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02. Przedstawiono zagadnienie niepewności pomiaru, badania i ryzyka związanego z decyzją podejmowaną na podstawie wyników badań. Poruszono również zagadnienia źródeł i budżetów niepewności.

**Słowa kluczowe:** Niepewność, wiarygodność, POD, NDT.

### ABSTRACT

Performing tests, we should consider their reliability and determine the extent to which a given non-destructive testing method or technique meets the assumed goals and expectations for the test. A parameter related to the measurement result characterising the dispersion of values, that can be justifiably attributed to the measured quantity is the measurement uncertainty. In non-destructive testing, at least in the part related to the detection of discontinuities, we are dealing with a more complicated situation. The first part of the article tried to explain the issue of determining POD curves (probability of detection), quantitatively presenting the probability of detecting discontinuities in non-destructive testing. The second part of the article focused on the practical approach used in research laboratories resulting from the requirements of the PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 standard. The issue of uncertainty of measurement, testing and risk associated with decisions made on the basis of test results is presented. The issues of sources and budgets of uncertainty were also discussed.

**Keywords:** Uncertainty, reliability, POD, NDT

### 1. Wstęp

Wykonując badania, powinniśmy zastanowić się nad ich wiarygodnością oraz określić, w jakim stopniu dana metoda czy technika badań nieniszczących spełnia założone cele i oczekiwania wobec badania. 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. W badaniach tych uzyskujemy wskazania, sygnały lub zobrażenia, 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.

W badaniach nieniszczących powszechną praktyką stało się ilościowe określanie wiarygodności wykrywania nieciągłości pod względem prawdopodobieństwa wykrycia (POD) i prawdopodobieństwa fałszywego wskazania (PFI).

W badaniach nieniszczących zakładamy, że szacowana nie jest niepewność pomiaru, lecz niepewność badania / niepewność wykrywania, jako parametr charakteryzujący wątpliwość co do wyniku badania. Niepewność wykrywania dotyczy tego, czy wykryto nieciągłość.

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,

\*Autor korespondencyjny.

E-mail: Pawel.Grzeskowiak@udt.gov.pl

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.

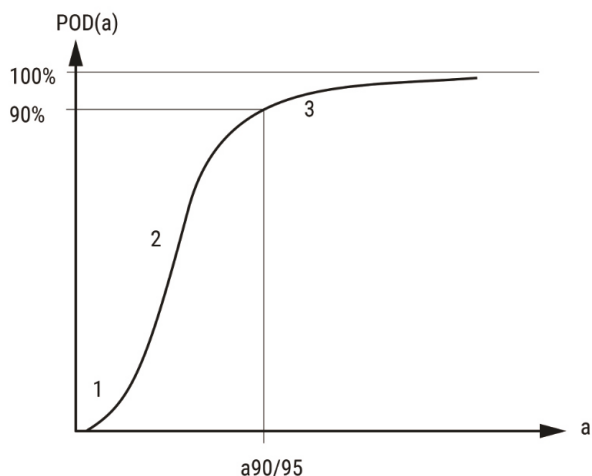
## 2. Prawdopodobieństwo wykrycia POD, rzeczywista krzywa POD

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.

1. materiał z nieciągłością – badanie wykazuje jej występowanie – PRAWDZIWE (+)/TP
2. materiał bez nieciągłości – badanie wykazuje jej występowanie – FAŁSZYWE (+)/FP
3. materiał z nieciągłością – badanie nie wykazuje jej występowania – FAŁSZYWE (-)/FN
4. materiał bez nieciągłości – badanie nie wykazuje występowania PRAWDZIWE (-)/TN

To są podstawy koncepcji „prawdopodobieństwa wykrycia” tj. POD. W badaniach nieniszczących koncepcja ta została wypracowana w NASA w latach 70. XX wieku. Badania nad



Rys. 1. Krzywa POD [1]

POD prowadzi się również w kilku innych miejscach na świecie.

POD stosowane jest dla oszacowania minimalnego rozmiaru nieciągłości, która zostanie niezawodnie wykryta za pomocą 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 progu istotnego (krytycznego) zostaną wykryte, a nieciągłości mniejsze niż te nie będą „wykrywane”. Narzędziem najczęściej używanym do opisu POD jest krzywa POD (Rys. 1).

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, symulującymi rzeczywiste nieciągłości, np. występujące w połączeniach spawanych. Sztuczne nieciągłości mają różne wymiary i kształty. Krzywe POD mogą być tworzone na podstawie wyników jednego operatora lub na podstawie grupy operatorów.

Analiza metodologii RRT wskazuje na poniżej wskazane problemy:

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

Na 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 uzyskać reprezentatywne wyniki POD. Trzeba również pamiętać, że próbki fizyczne do wyznaczania POD są walidowane przy użyciu metod niszczących.

Zatem POD jest również funkcją tego, co jest definiowane jako nieciągłość, a ponieważ niepewność w określaniu „rzeczywistego” wymiaru nieciągłości występuje również w badaniach niszczących, wyniki wyznaczania POD nie są wyłącznie funkcją techniki badań nieniszczących – są obarczone również niepewnością badań niszczących.

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 obliczenia POD wg metody „trafienie/chybiecie”

- POD jest równe prawdopodobieństwu TP i można go 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:

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

#### Możliwość uzyskania fałszywych wskazań - fałszywego alarmu PFI(A).

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

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

Prawdopodobieństwo wykrycia nieciągłości POD jest miarą opisującą dokładność badania.

Ta metoda statystyczna określa, na ile dobrze procedura badania pozwala na wykrywanie istotnych, zdefiniowanych niedoskonałości (Rys. 1):

- odcinek (1) bardzo małe nieciągłości są trudne do wykrycia, z bardzo małym prawdopodobieństwem.
- odcinek (2) większe nieciągłości są wykrywane, z coraz większym prawdopodobieństwem.
- odcinek (3) wszystkie nieciągłości o wielkości „a” 90/95 są wykrywane, z prawdopodobieństwem 90% przy 95% 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 szacuje zdolność wykrywania metody/techniki badań w odniesieniu do rozmiaru nieciągłości.

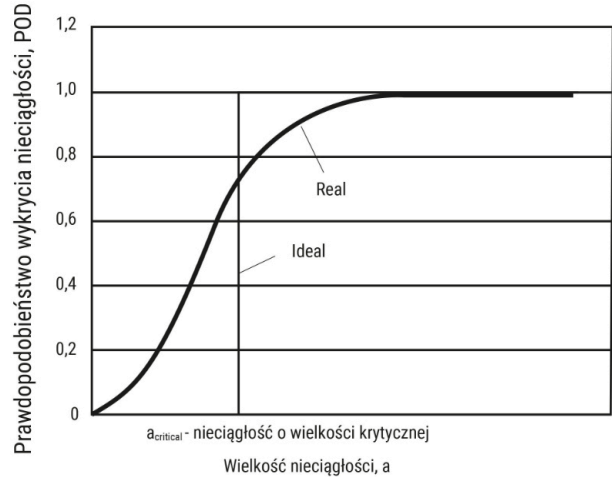
W idealnej metodzie/technice POD dla nieciągłości mniejszych niż ustalony wymiar krytyczny miałyby wartość zero (Rys. 2). Z drugiej strony nieciągłości o wielkości większej niż wymiar krytyczny miałyby POD równe 1 lub 100% prawdopodobieństwa wykrycia.

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

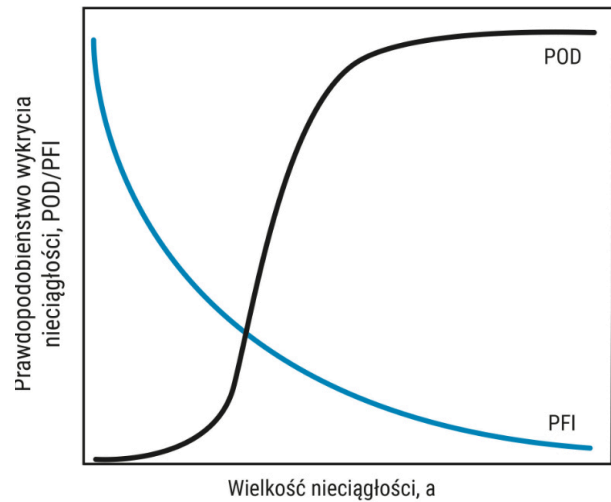
W rzeczywistości krzywe POD nie są idealne, ponieważ zawierają odcinki fałszywie dodatnie i fałszywie negatywne.

Prawdopodobieństwo wykrycia nieciągłości POD oraz prawdopodobieństwo wystąpienia fałszywych wskazań PFI(A) zależą głównie od rodzaju nieciągłości i rozmiarów nieciągłości (Rys. 3) oraz przyjętego poziomu badania.

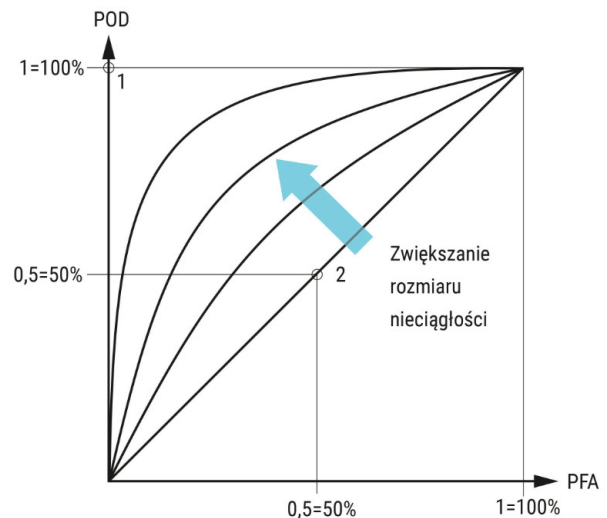
Wartości POD i PFI(A) naniesione na współrzędne x jako PFA i y (POD) dają w wyniku krzywą (Rys.4) zwaną operacyjną charakterystyką wiarygodności ROC (Reliability Operating Characteristic).



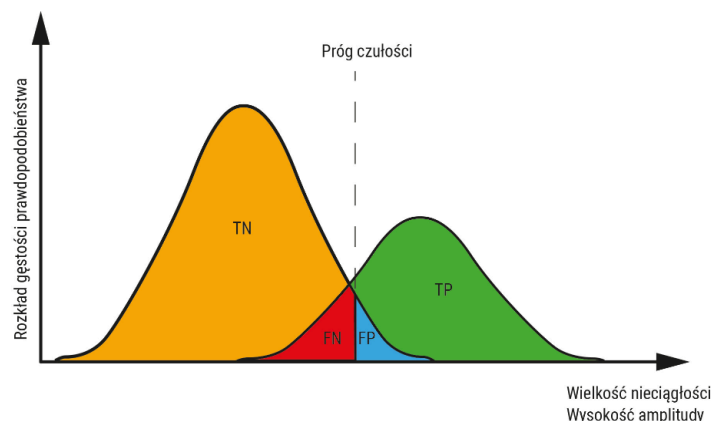
Rys. 2. Krzywa POD rzeczywista i idealna.



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



Rys. 4. Przykładowa krzywa ROC. Podejście do względnej charakterystyki operacyjnej (ROC) jako ilościowego określania wiarygodności badania [3]



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

Rysunek 5 przedstawia stan 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).

Z uzyskanych wskazań możemy mieć cztery przypadki możliwych wyników badania. W zależności od określonej czułości badania otrzymujemy różne przypadki: przesuwając próg czułości badania na lewo, tym więcej istniejących nieciągłości może zostać wykrytych - FN ulegnie zmniejszeniu, ale równocześnie pojawia się więcej fałszywych wskazań od nieistniejących nieciągłości (FP), co jest zgodne z krzywą ROC (Rys. 4).

Na podstawie krzywej ROC można ocenić wiarygodność badań nieniszczących, najczęściej stosowaną formułą wiarygodności jest wyrażenie:

z którego wynik iż:

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

- 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.

Punkt 1 na Rys. 4 z PFA równym 0 i POD równym przedstawia wynik idealnego badacza. Natomiast, 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, czułość systemu wzrasta.

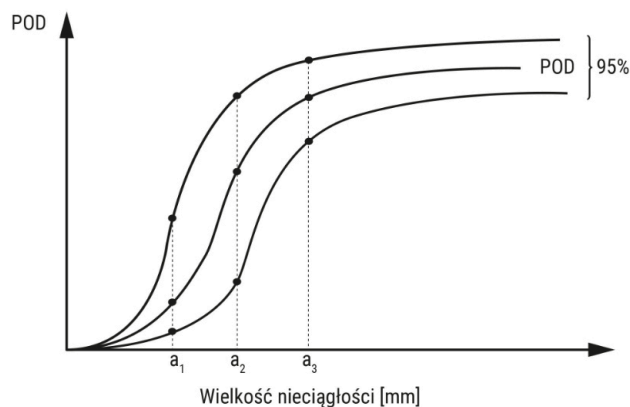
Na podstawie wyników badań przeprowadzonych w ramach różnych programów badawczych, takich jak API, PISC (Programme of the Inspection of Steel Components) czy NORDTEST, można przyjąć, że dla większości badań nieniszczących osiąga się POD na poziomie 60–70%. Wytyczne NORDTEST dotyczące wiarygodności badań

nieniszczących (NORDTEST REPORT NT TR 394:1998) zakładają, że badania nieniszczące powinny być prowadzone tak, aby możliwe było uzyskanie  $POD = 90\%$  z 95% poziomem ufności, tzn. powinniśmy wykrywać 45 nieciągłości z występujących w rzeczywistości 46 nieciągłości. Jak to kryterium jest trudne do spełnienia, najlepiej ilustruje przykład wyników badań na próbkach obiegowych (Round Robin Testing, RRT), przeprowadzonych na złączach spawanych doczołowych o grubości 30–50 mm. Badania organizowane przez NIL (Holenderski Instytut Spawalnictwa) były weryfikowane badaniami niszczącymi. Okazało się, że ręczne badania ultradźwiękowe dały  $POD = 52,3\%$ , badania ultradźwiękowe zmechanizowane  $POD = 83,6\%$ .

### 3. Przedział ufności i poziom ufności

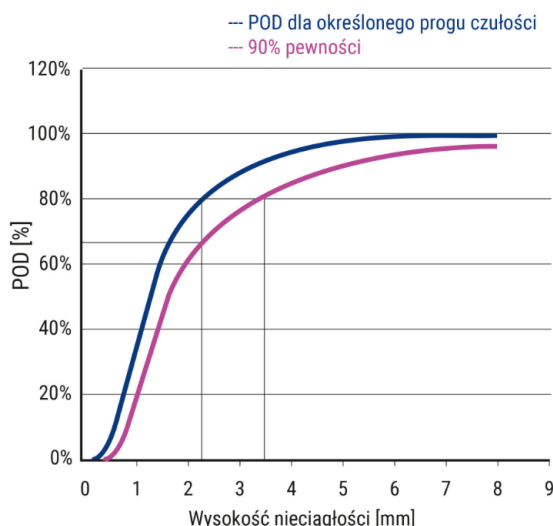
Przedział ufności i poziom ufności to dwa ważne terminy statystyczne opisujące dokładność wyników odzwierciedlające tło statystyczne:

- przedział ufności określa zakres wokół głównej wartości, w którym można znaleźć najwięcej wartości.
- poziom ufności odzwierciedla prawdopodobieństwo tego, ile wartości mieści się w przedziale ufności. W większości przypadków poziom ufności ustalany jest na 95% lub 99% (Rys. 6).



Rys. 6. Krzywa POD z pasmem rozrzutu uwzględniającym poziom ufności 95%, z odniesieniem do nieciągłości o różnych wymiarach [5].





Rys. 7. POD w odniesieniu do wysokości nieciągłości [4]

Każdy wynik badania zmienia się wokół nieznannej wartości rzeczywistej. Jeśli jedna konkretna nieciągłość zostanie wykryta więcej niż raz, zarejestrowane wartości będą się różnić od prawdziwej wartości, która nie jest dokładnie znana.

Przedział i poziom ufności są ze sobą skorelowane i określane przez kilka czynników. Im większy jest przedział ufności, tym:

- mniejszy rozmiar nieciągłości,
- większe odchylenie standardowe,
- bardziej rozszerza się poziom ufności.

Jak można opisać poziom ufności? Dobrym sposobem opisanie krzywej ufności (np. 95%) jest poniższe stwierdzenie.

Jeżeli rzeczywista krzywa POD miałyby 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 prawdziwa krzywa POD znajduje się powyżej krzywej pewności.

**Rysunek 7** przedstawia krzywą POD, która wskazuje, że istnieje 80% prawdopodobieństwo wykrycia nieciągłości o wysokości 2,2 mm i możemy stwierdzić z 90% 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%.

#### 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 określenie wiarygodności wykrywania nieciągłości uwzględniającego 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 PC. Rozwój modeli symulacyjnych następuje szczególnie znacząco w lotnictwie i kosmonautyce. Walidacje tych modeli pozwalają na stwierdzenie, że można uzyskać prognozy POD, które są porównywalne z przewidywaniami uzyskanymi w próbach eksperymentalnych.

Jakie korzyści przynosi modelowanie POD?

1. Zaletą korzystania z modeli jest to, że wyniki można uzyskać stosunkowo łatwo i niewielkim kosztem. W badaniach eksperymentalnych wykonywana byłaby praca zmieniająca parametry badania, takie jak np.: szybkość skanowania, orientacja nieciągłości, ustawienie progu, w celu uzyskania spójnych szacunków ich wpływu na POD i PFI. Modelowanie pozwala na optymalizację badań pod kątem kosztów i korzyści.
2. Drugą bardzo ważną zaletą obliczeń modelowych jest to, że istnieje bardzo mało danych eksperymentalnych 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 umożliwia rozszerzenie danych eksperymentalnych na nowe zastosowania.

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

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

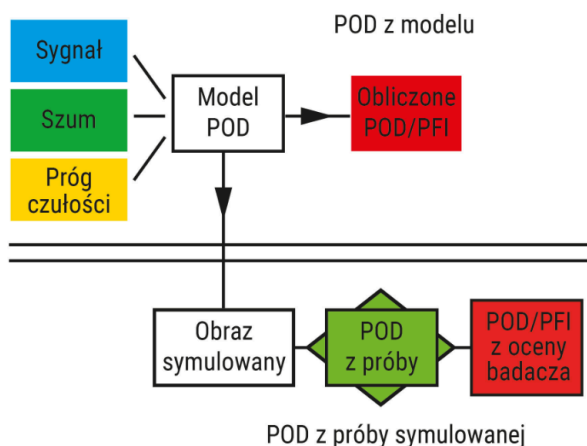
Podejście do obliczania POD jest podobne do fizycznych modeli eksperymentalnych. Ta metoda pozwala uniknąć trudności statystycznych związanych z konwencjonalnymi próbami POD i umożliwia przewidywanie POD dla nowych technik badań, które mogą być zbyt złożone, aby można je modelować fizycznie.

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.



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

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 lub na określonym obszarze lub bardziej zbliżone do rzeczywistego działania systemu badawczego.

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 [7].

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/nieciągłości (Rys. 8) – POD i PFI są obliczane automatycznie.

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 wieku w Iowa State University zaadaptowano symulator ultradźwiękowy oparty na CAD, aby uzyskać 3-D symulację badań UT oraz wykresy POD [8].

### Modele statystyczne

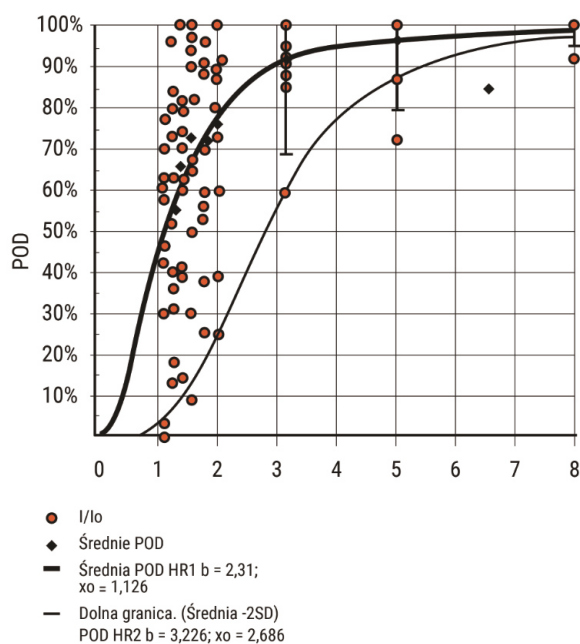
Wykorzystują metody analizy statystycznej lub dopasowywania krzywych do danych eksperymentalnych w celu udostępnienia tych danych do wykorzystania w innych zastosowaniach (takich jak mechanika pęknięcia). Nie modelują one procesu badania jako takiego.

### Modele niezawodności człowieka

Uwzględniają one wpływ błędu ludzkiego w procesie kontroli i korygują przewidywane wartości POD dla tych skutków. 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. Rozróżniamy zadania badawcze obejmujące „wzrok” i „koordynację wzrokowo-ruchową”. Metody empiryczne zostały opracowane na podstawie danych empirycznych, które mają na celu uwzględnienie skutków błędu ludzkiego w procesie badania oraz prawidłowe przewidywane modelowe wartości POD dla tych skutków.

Przykładem może być metodologia zastosowana przez firmę AEA Technology, która wykorzystuje dane o błędach



**Rys. 9.** Krzywe POD dla niezawodności człowieka wyprowadzone z danych dotyczących niezawodności człowieka z eksperymentów w PISC III przy użyciu ultradźwiękowego symulatora AEA Technology PCSIMONE (I/Io to sygnał (I) podzielony przez próg czułości Io) [10]

ludzkich z pracy PISC III i inne źródła do korygowania przewidywań modelu [10]. Aby zapewnić, że przewidywania modelu będą porównywalne z tymi, które można uzyskać w próbach eksperymentalnych, wykorzystuje się współczynnik  $H$ .

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

Korekcja wykorzystuje stały współczynnik redukcji POD, zazwyczaj 95% lub mniej w trudniejszych warunkach. Lepsza metoda korekcji wykorzystuje krzywe, takie jak dane dotyczące błęd ludzkiego wyrażone jako POD na Rys. 9, pochodzące z danych PISC III.

Wykres pokazuje, że skutki błędu ludzkiego są większe w przypadku małych nieciągłości bliskich wartości progowej. W tym przypadku błąd ludzki jest używany jako współczynnik  $H$ . Wartości korekcji błęd ludzkiego zostały również wyprowadzone przez porównanie danych z symulacyjnych prób modelowych (visual POD/PFI) z danymi eksperymentalnymi lub z porównania prób terenowych i laboratoryjnych.

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

## 5. Walidacja

Walidacja modeli jest ważna dla uzyskania większej akceptacji dla ich wykorzystania. Modele pod są oparte na fizycznych modelach do kontroli ultradźwiękowej i radiograficznej, które zostały sprawdzone i zweryfikowane przez wiele lat.

Aby zweryfikować istniejące modele POD, stosowane są następujące podejścia:

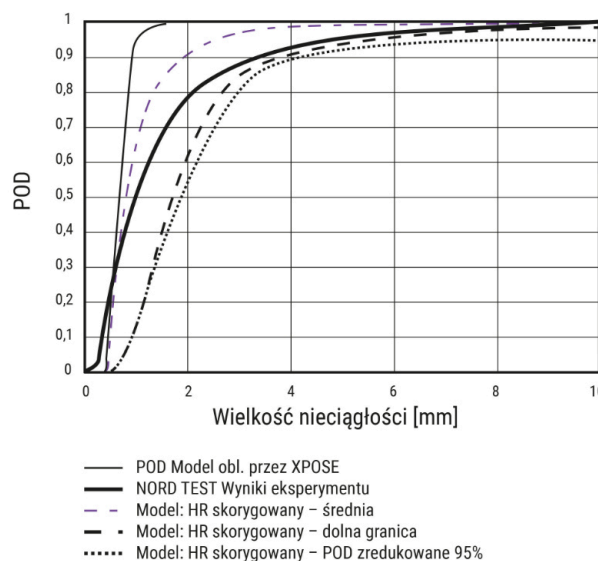
- porównanie z eksperymentalnymi danymi POD (Rys. 11),
- porównanie symulowanych obrazów z rzeczywistymi obrazami,
- używanie symulowanych obrazów w próbach POD („Visual POD PFI”).

## 6. Zastosowania modeli POD

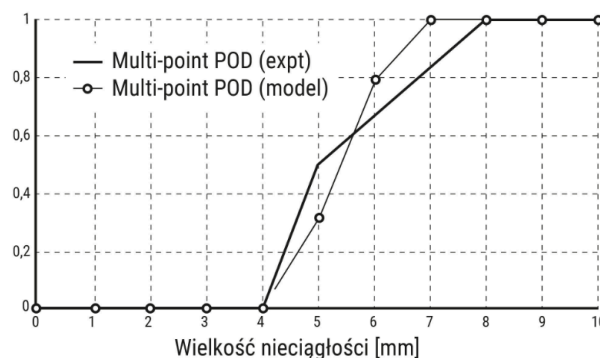
Modele POD mają zastosowanie we wszystkich obszarach, w których obecnie wykorzystywane są eksperymentalne dane NDT dotyczące niezawodności m.in.:

- walidacja badania,
- porównywanie technik badania,
- wkład do przypadków bezpieczeństwa (np. ubezpieczyciele),
- ekonomia,
- wkład w mechanikę pęknięcia i oceny integralności,
- przewidywanie rozkładu nieciągłości,
- optymalizacja wydajności i procedur kontroli,
- pomoc we wprowadzaniu nowej technologii.

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



**Rys. 10.** Przykład pokazujący korekcję modelowej krzywej POD pod kątem błędu 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) [10]



**Rys. 11.** Walidacja modelu - porównanie modelowych i eksperymentalnych krzywych POD dla ultradźwiękowej kontroli C-scan pod kątem rozwarstwienia w płycie CFRP (carbon fiber reinforced polimer) [10]

- badania parametryczne i wrażliwości,
- ocena historycznych danych z badania (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 bezpieczeństwa i walidacji badań.



## 7. Podsumowanie

Komputerowe modelowanie niezawodności badań stanowi najlepszą drogę do oceny nieniszczących metod i technik badawczych NDT. Jest szybkim i ekonomicznie opłacalnym uzupełnieniem lub alternatywą dla eksperymentalnych metod. Trudność komputerowego modelowania polega głównie na tym, że nie jest łatwo ocenić wewnętrzną pewność eksperymentu, ponieważ trudno jest wyizolować skutki czynników ludzkich i środowiska. Modelowe metody wyznaczania wartości niezawodności są stosowane od wielu lat w przemyśle lotniczym.

Obecnie dostępnych jest wiele modeli komputerowych do przewidywania wiarygodności badań pod względem prawdopodobieństwa wykrycia (POD) i fałszywych wskazań (PFI). Obejmują one coraz większy zakres technik badań i działają w czasie rzeczywistym 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 pod kątem błędu ludzkiego ewoluują. 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 niedostępnych z pomiarów eksperymentalnych, takich jak badania parametryczne, ocena danych historycznych i optymalizacja na etapie projektowania. Inne zastosowania obejmują walidację i kwalifikację badań, a także modele są cenną pomocą w kwalifikowaniu i szkoleniu inspektorów.

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 ludzi i środowiska, wartości POD uzyskiwane za pomocą modelowania są zbliżone z wartościami uzyskiwanymi w badaniach eksperymentalnych.

Modele komputerowe są ściśle powiązane z eksperymentalnymi próbami POD. Stosowanie tych modeli wpływa na zmniejszenie liczby wymaganych fizycznych próbek badawczych. Takie podejście pomaga w zapewnieniu walidacji i polepsza wyniki przewidywania modeli POD oraz metod korekcji stosowanych w odniesieniu do ludzi i środowiska. 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 do osiągnięcia.

## 8. Literatura

- [1] <https://wiki.tum.de/>
- [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] [https://wiki.tum.de/download/attachments/222201695/ROC\\_curve\\_png\\_version=1&modificationDate=1554363923277&ai=v2](https://wiki.tum.de/download/attachments/222201695/ROC_curve_png_version=1&modificationDate=1554363923277&ai=v2) oraz <https://www.ndt.net/article/ecndt98/reliabil/325/325.htm>
- [4] Introduction to the Statistics of NDTE. Ginzel - Materials Research Institute
- [5] Nondestructive Testing Methods and New Applications, Edited by Mohammed Omar
- [6] 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
- [7] Wall M: Modelling of Inspection Reliability, Engineering Science and Education Journal, Vol. 6 No. 2 pp63-72 April 1997
- [8] 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
- [9] R. A. Murgatroyd et al: Human Reliability in Inspection: Results of Action 7 of PISC III Programme, 1994
- [10] 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



Paweł Grześkowiak. Ukończył Wydział Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej, specjalność Technologia Maszyn – Spawalnictwo oraz Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej, specjalność Zarządzanie i Inżynieria Produkcji. W Urzędzie Dozoru Technicznego, Centralnym Laboratorium Dozoru Technicznego w Poznaniu pracuje od 17.12.1990 r. Obecnie pracuje w Urzędzie Dozoru Technicznego Oddział terenowy w Poznaniu, Dział Badań Laboratoryjnych, od 01.12.2019 r. jako Główny Specjalista w Zespole Badań Materiałowych. Zajmuje się badaniami nieniszczącymi oraz prowadzeniem badań materiałowych niszczących, m. in.: metalograficznych i badaniami własności mechanicznych. Prowadzi ekspertyzy materiałowe obejmujące swoim zakresem m. in. diagnostykę urządzeń i ocenę stopnia degradacji materiałów, ekspertyzy związanymi z badaniami przyczyn niebezpiecznych uszkodzeń i nieszczęśliwych wypadków urządzeń technicznych. Posiada kwalifikacje NDT potwierdzone certyfikatem 3. stopnia, wg PN-EN ISO 9712 w metodach: VT, PT, MT, UT, RT. Prowadzi szkolenia związane z zagadnieniami badań materiałowych nieniszczących i niszczących, systemami zarządzania jakością w laboratoriach badawczych, normalizacją.