

INSPEKTOR

TECHNIKA I BEZPIECZEŃSTWO

Wydanie specjalne

CENTRALNE LABORATORIUM DOZORU TECHNICZNEGO

BADANIA I ANALIZA STANU TECHNICZNEGO URZĄDZEŃ I INSTALACJI

- ZASIĘG
- SZKOLENIA
- MOBILNOŚĆ
- WYPOSAŻENIE
- PERSONEL



AKADEMIA UDT

KURSY Z ZAKRESU BADAŃ NIENISZCZĄCYCH NDT

- Jesteśmy ośrodkiem szkoleniowym NDT pozytywnie ocenionym i zatwierdzonym przez Jednostkę Certyfikującą Osoby UDT-CERT
- Nasze szkolenia przygotowują do egzaminów certyfikacyjnych według normy PN-EN ISO 9712 w zakresie badań nieniszczących
- Kursy z zakresu badań nieniszczących NDT prowadzone są wg nowej normy PN-EN ISO 9712:2022-09

Nasze kursy:

Badania wizualne VT-1i2

Badania ultradźwiękowe UT-1i2

Badania radiograficzne RT-1i2

Badania magnetyczne MT-1i2

Badania penetracyjne PT-1i2

Kurs podstawowy BASIC G-3

Kursy uaktualniające wiedzę VT-2U, UT-2U, RT-2U, MT-2U, PT-2U

Metody główne badań nieniszczących VT-3, UT-3, RT-3, MTPT-3



ZAPRASZAMY DO ZAPOZNANIA SIĘ Z OFERTĄ SZKOLEŃ AKADEMII UDT!

Potrzebujesz szkolenia dostosowanego do potrzeb firmy? Napisz – szkolenia@udt.gov.pl



<https://www.udt.gov.pl/inspektor-on-line>



Szanowni Państwo,

tym razem specjalne wydanie magazynu UDT kierujemy do wszystkich zainteresowanych badaniami, oceną i analizą stanu technicznego urządzeń i instalacji. Projekty badawcze prowadzone są przez ekspertów UDT od dziesiątek lat. Wykorzystujemy do tego wiele zaawansowanych metod badawczych zarówno nieniszczących, jak i tych wymagających preparatyki lub przygotowania specjalnych próbek z badanego materiału. Takie oceny stanu mikrostruktury oraz badania właściwości wytrzymałościowych wspierają inżynierów na etapie wytwarzania, umożliwiają prowadzenie bezpiecznej eksploatacji oraz predykcji zdarzeń awaryjnych i regularne podnoszenie poziomu zarządzania bezpieczeństwem technicznym.

Zapraszam do zapoznania się z nową strukturą Centralnego Laboratorium Dozoru Technicznego i szerokimi możliwościami badawczymi UDT dla wielu gałęzi przemysłu takich jak chemia, petrochemia, energetyka, ciepłownictwo, budownictwo lub logistyka.

Zachęcam też do zapoznania się z innymi wydaniem specjalnymi magazynu UDT „Inspektor DŹWIGI”, „Inspektor ENERGETYKA” oraz „Inspektor CHEMIA”.

Zapraszam do rozwojowej lektury

Redaktor Naczelna
Dr inż. Małgorzata Suś-Ryszkowska
Departament Innowacji i Rozwoju
Urząd Dozoru Technicznego

w numerze

- 4 CENTRALNE LABORATORIUM DOZURU TECHNICZNEGO
PODSUMOWANIE OSTATNICH LAT DZIAŁALNOŚCI
I DALSZE PLANY ROZWOJU
- 10 SPÓJNOŚĆ POMIAROWA, WZORCOWANIE URZĄDZEŃ
POMIAROWYCH
- 14 CERTYFIKACJA PERSONELU WEDŁUG PN-EN ISO
9712:2022-09
- 20 ZNACZENIE LABORATORIÓW UZNANYCH DLA DOZURU
TECHNICZNEGO
- 24 NIEPEWNOŚĆ I WIARYGODNOŚĆ BADAŃ
NIENISZCZĄCYCH
- 36 BADANIE KOMPATYBILNOŚCI ZBIORNIKÓW
Z TWORZYW SZTUCZNYCH
DO MAGAZYNOWANIA WODORU
- 42 WYSOKOTEMPERATUROWY ATAK WODOROWY
PROCEDURA WYKRYWANIA HTHA
- 48 BADANIA ULTRADŹWIĘKOWE ZŁĄCZY SPAWANYCH
ELEMENTÓW CIENKOŚCIENNYCH TECHNIKĄ
PHASED ARRAY (PAUT)
- 52 OCENA STANU TECHNICZNEGO ZBIORNIKÓW MAGA-
ZYNOWYCH Z ZASTOSOWANIEM TECHNIKI
PHASED ARRAY
- 56 OKREŚLENIE GRUBOŚCI ELEMENTÓW
Z KOROZJĄ WŹEROWĄ METODĄ STATYSTYCZNĄ
- 62 BADANIE METODĄ EMISJI AKUSTYCZNEJ
HYDROAKUMULATORÓW W SIŁOWNIACH WIATROWYCH
- 68 ZASTOSOWANIE SKANINGOWEJ MIKROSKOPII
ELEKTRONOWEJ W BADANIACH MATERIAŁÓW
INŻYNIERSKICH
- 77 ROZWÓJ LABORATORIUM BADAŃ KOMPATYBILNOŚCI
ELEKTROMAGNETYCZNEJ W CLDT
- 80 ZAGROŻENIA WYNIKAJĄCE Z ODDZIAŁYWANIA HAŁASU
- 83 BADANIA URZĄDZEŃ GRZEWCZYCH NA PALIWA STAŁE.
DZIAŁANIA ZMIERZAJĄCE DO POPRAWY JAKOŚCI
POWIETRZA
- 88 BEZPIECZNA I EFEKTYWNA EKSPLOATACJA KOTŁÓW
WODNYCH I PAROWYCH
- 95 DRONY W SŁUŻBIE BEZPIECZEŃSTWU
- 98 DRONY UDT WSPIERAJĄ REWIZJE ZBIORNIKÓW PALIWA

BIULETYN URZĘDU DOZURU TECHNICZNEGO

INSPEKTOR

TECHNIKA I BEZPIECZEŃSTWO

Wszelkie prawa zastrzeżone © Urząd Dozoru Technicznego
Redakcja zastrzega sobie prawa do skracania i redagowania tekstów.

Bezpłatny biuletyn Urzędu Dozoru Technicznego
ul. Szczęśliwicka 34, 02-353 Warszawa
inspektor@udt.gov.pl, www.udt.gov.pl

Redaktor Naczelna:
Małgorzata Suś-Ryszkowska



<https://www.udt.gov.pl/inspektor-on-line>



CENTRALNE LABORATORIUM DOZORU TECHNICZNEGO

Podsumowanie ostatnich lat działalności
i dalsze plany rozwoju

Wywiad z Karolem Formowiczem, dyrektorem Centralnego Laboratorium Dozoru Technicznego

- rozmawia Małgorzata Suś-Ryszkowska, redaktor naczelna biuletynu „Inspektor Technika i Bezpieczeństwo”.



MGR INŻ. KAROL FORMOWICZ

Dyrektor Centralnego Laboratorium Dozoru Technicznego, absolwent Wydziału Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej Akademii Górniczo-Hutniczej. Ukończył studia podyplomowe Międzynarodowy/Europejski Inżynier Spawalniki IWE. Ekspert z zakresu badań nieniszczących i badań materiałowych, kierownik kilku projektów strategicznych UDT, certyfikowany Project Manager. Współtwórca nowej struktury Centralnego Laboratorium Dozoru Technicznego.

Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego (CLDT) to pierwsze w Polsce akredytowane laboratorium badawcze. Choć funkcjonuje już od dziesięcioleci, to od 2018 roku obserwujemy intensywny rozwój jego działalności. Czy możemy przypomnieć naszym czytelnikom kilka najważniejszych zmian i inicjatyw, które miały miejsce w tym okresie?

Najistotniejszą i najbardziej zauważalną zmianą, którą obserwujemy w obszarze działalności laboratoryjnej UDT, jest wypracowanie i wdrożenie nowego modelu świadczenia usług laboratoryjnych oraz wzrost ich dostępności dla klientów zewnętrznych. Dotychczasowa struktura organizacyjna oparta na jednym laboratorium – Centralnym Laboratorium Dozoru Technicznego (CLDT) z siedzibą w Poznaniu, została przekształcona w rozwiniętą sieć laboratoriów stacjonarnych i mobilnych na terenie całego kraju.

Jako organizacja ekspercka o wysokich kompetencjach inżynierskich staramy się być zawsze blisko środowiska naukowego. Dlatego aktywnie współpracujemy z uczelniami technicznymi i instytutami badawczymi. Tego typu działania pozwoliły nam na uruchomienie laboratoriów stacjonarnych we współpracy z Wydziałem Mechanicznym Technologicznym







(dawniej Wydział Inżynierii Produkcji) Politechniki Warszawskiej i Centrum Energetyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Laboratoria badawcze UDT CLDT w Warszawie i Krakowie mają dziś ugruntowaną pozycję na rynku, a partnerstwo Urzędu Dozoru Technicznego i ośrodków naukowych ułatwia nam transfer wiedzy oraz pozyskiwanie personelu o pożądanych kompetencjach.

Poza rozwojem stacjonarnych laboratoriów badawczych nasz personel wykorzystuje laboratoria mobilne. Dzięki specjalistycznym samochodom wyposażonym w odpowiednią aparaturę możemy wykonywać badania w terenie – w miejscu zainstalowania urządzeń technicznych.

Poza rozwojem stacjonarnych laboratoriów badawczych nasz personel wykorzystuje laboratoria mobilne. Dzięki specjalistycznym samochodom wyposażonym w odpowiednią aparaturę możemy wykonywać badania w terenie – w miejscu zainstalowania urządzeń technicznych. Dysponujemy obecnie flotą laboratoriów mobilnych przystosowanych do wykonywania badań nieniszczących metodami VT, PT, MT, UT oraz badań struk-



Laboratoria UDT CLDT

- 1  CLDT laboratorium stacjonarne
- 2  laboratorium mobilne NDT
- 3  laboratorium mobilne AT
- 4  laboratorium mobilne do badań kotłów na paliwo stałe
- 5  laboratorium mobilne AT 4x4 do badań hydroakumulatorów w siłowniach wiatrowych
- 6  laboratorium mobilne NDT/AT

Rys. 1. Mapa laboratoriów stacjonarnych i mobilnych UDT CLDT

tury metodą replik i pomiarów twardości. Posiadamy również laboratoria dostosowane do badań metodą emisji akustycznej oraz badań kotłów na paliwa stałe. Laboratoria mobilne zapewniają praktycznie nieograniczony zasięg działania. Dzięki nim nasze usługi mogą być realizowane znacznie szybciej. Laboratoria mobilne poszerzają także możliwości badawcze UDT i uzupełniają działania laboratoriów stacjonarnych.

Wraz z rozwojem sieci laboratoriów rozszerzyliśmy zakres akredytacji zarówno laboratorium badawczego (certyfikat akredytacji nr AB 001), jak i laboratoriom wzorcującym (certyfikat akredytacji nr AP 136) o nowe metody badań i wzorcowań. Pozytywne wyniki ocen prowadzonych przez Polskie Centrum Akredytacji (PCA) są potwierdzeniem wysokich kompetencji technicznych naszej kadry oraz jakości wykonywanych badań i wzorcowań.

Ważną inicjatywą jest również doskonalenie procesu uznawania laboratoriów badawczych przez UDT. Nasi specjaliści opracowali Warunki Techniczne Urzędu Dozoru Technicznego „Uznawanie laboratoriów. Ocena kompetencji laboratoriów badawczych” (WUDT-LAB Wydanie 3/2022). Dokument ten określa wymagania, jakie powinny spełniać laboratoria badawcze, aby wyniki prowadzonych przez nie badań urządzeń technicznych i materiałów mogły być uznawane przez UDT. Warto zaznaczyć, że Warunki nie są tożsame z wymaganiami normy PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 „Ocena kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących”. W WUDT-LAB ujednolicono zarówno wymagania dotyczące systemu zarządzania funkcjonującego w laboratorium, jak i wymagania techniczne związane bezpośrednio z procesem wykonywania badań. Kryteria oceny stosowane podczas ocen kompetencji laboratoriów badawczych zostały tym samym ustandaryzowane. Dodatkowo w tym roku udostępniłmy „Przewodnik dotyczący stosowania warunków technicznych Urzędu Dozoru Technicznego WUDT-LAB wydanie 3/2022”, w którym wyjaśniamy i opisujemy bardziej szczegółowo każde z wymagań zapisane w Warunkach.

W trakcie audytów w laboratoriach wykonujących badania nieniszczące wykorzystujemy specjalne próbki referencyjne. Pozwalają one na weryfikację wiedzy i umiejętności personelu działającego w obszarze badań NDT. Od kilku lat organizujemy również webinaria dla laboratoriów badawczych, w trakcie których omawiane są bieżące zagadnienia związane z procesem uznawania laboratoriów.

Skuteczne funkcjonowanie sieci laboratoriów badawczych zależy m.in. od ich zasięgu, dostępności i wyposażenia badawczego, jakim dysponują eksperci CLDT. Na jakich obszarach w tym zakresie obecnie skoncentrowane jest kierownictwo laboratoriów?

Konsekwentnie rozwijamy sieć laboratoriów stacjonarnych i mobilnych sygnowanych znakiem CLDT. W sierpniu 2024 r. w laboratorium w Płocku zakończono – z wynikiem pozytywnym – proces akredytacji na zgodność z wymaganiami normy PN-EN ISO/IEC 17025. Audytorzy PCA potwierdzili wysokie kompetencje tej jednostki. Laboratorium w Płocku zostało tym samym czwartą akredytowaną placówką laboratoryjną działającą w strukturze UDT CLDT. Zakres akredytacji tego laboratorium obejmuje badania nieniszczące w następujących metodach: VT, PT, MT i UT.

Ponadto chcemy zwiększyć dostępność badań metodą emisji akustycznej (AE – ang. Acoustic Emission). Jest to metoda, która znajduje zastosowanie w badaniach okresowych urządzeń technicznych użytkowanych m.in. w instalacjach rafineryjno-petrochemicznych, zakładach chemicznych czy też na farmach wiatrowych. Obecnie tego typu badania są wykonywane przez laboratoria UDT CLDT w Krakowie i Poznaniu. Od

2023 r. notujemy wzrost aktywności w zakresie działań realizowanych na rzecz kluczowych klientów z sektora energetycznego, petrochemicznego i rafineryjnego. Wykonujemy badania diagnostyczne i ekspertyzy techniczne podczas postojów remontowych urządzeń i instalacji infrastruktury krytycznej.

Oprócz tradycyjnych pomiarów metodą emisji akustycznej, oferujemy naszym klientom usługi polegające na długookresowym monitoringu urządzeń w trakcie ich eksploatacji. Takie rozwiązanie jest szczególnie przydatne w odniesieniu do obiektów, w których wykryto uszkodzenia.

Oprócz tradycyjnych pomiarów metodą emisji akustycznej, oferujemy naszym klientom usługi polegające na długookresowym monitoringu urządzeń w trakcie ich eksploatacji. Takie rozwiązanie jest szczególnie przydatne w odniesieniu do obiektów, w których wykryto uszkodzenia. Dzięki monitorowaniu niezgodności możliwe jest podejmowanie działań pozwalających na zapobieganie uszkodzeniu danego obiektu, np. poprzez zmianę jego parametrów eksploatacyjnych. Ewentualne przekroczenia przyjętych kryteriów pozwalają na przesłanie informacji o danym zdarzeniu, jego zapisanie w bazie pomiarowej i późniejsze przeanalizowanie.

Kolejną metodą badawczą, którą intensywnie rozwijamy, są badania ultradźwiękowe. Konsekwentnie wdrażamy do zastosowania nowoczesne techniki badań ultradźwiękowych, tj. UT-TOFD, UT-TULA, UT-PA, UT-TFM. Korzyści z ich zastosowania jest wiele. Do najważniejszych z nich można zaliczyć np. zwiększenie czułości badań, zapewnienie większej powtarzalności pomiarów, możliwość wykonywania badań elementów o zróżnicowanej geometrii, np. cienkościennych złączy spawanych, stref krytycznych w zbiornikach magazynowych. Poszczególne jednostki laboratoryjne są sukcesywnie wyposażane w odpowiednie defektoskopy, głowice ultradźwiękowe, klipy, bloki kalibracyjne i referencyjne.

Ciekawym rozwiązaniem, które popularyzujemy, są badania z wykorzystaniem impulsowych prądów wirowych (PEC – ang. Pulsed Eddy Current). Technika PEC jest szczególnie przydatna do badań urządzeń znajdujących się w fazie eksploatacji, które są narażone na wystąpienie korozji pod izolacją (CUI – ang. Corrosion Under Insulation). Dzięki zastosowaniu tej techniki badawczej użytkownik danego urządzenia może ograniczyć zakres prac izolerskich związanych z przygotowaniem powierzchni do badań, co w znaczącym stopniu skraca czas i zmniejsza koszty związane z prowadzonymi pracami.

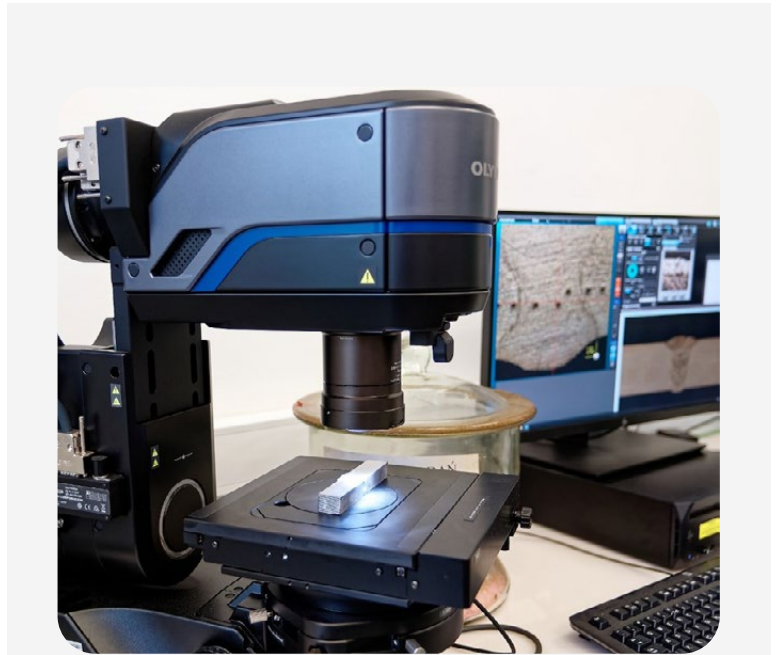
Naszą uwagę chcemy również skoncentrować na pomiarach wykonywanych za pomocą kamery wzmacniającej drgania. Każdy piksel na obrazie zarejestrowanym przez specjalną kamerę może pełnić rolę czujnika zdolnego do pomiaru drgań. Daje to możliwość mierzenia i kwantyfikowania ruchu dowolnych konstrukcji, które można sfilmować. Wykrywane są przemieszczenia na poziomie od 2,5 µm, które następnie wzmacnia się do poziomu rejestrowalnego dla człowieka. Oprogramowanie komputerowe pozwala w dalszej kolejności na wyizolowanie i wyselekcjonowanie indywidualnych częstotliwości w zarejestrowanym, wzmocnionym obrazie ruchu. Pomiaru wykonywane za pomocą kamery wzmacniającej drgania pozwalają m.in. na weryfikację prawidłowości mocowania rurociągów czy posadowienia maszyn lub identyfikację źródeł wibracji w większych układach pracujących obok siebie urządzeń.

Badania NDT są często stosowane w procesach kontroli jakości i jako narzędzie do oceny stanu technicznego urządzeń. Czy oprócz tej grupy badań Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego planuje rozszerzać działalność w innych obszarach?

Mimo iż nasze laboratoria są ukierunkowane na wykonywanie badań NDT, to warto podkreślić, że zakres świadczonych przez UDT CLDT usług jest znacznie większy. W pierwszej kolejności chciałbym przypomnieć, że laboratoria UDT CLDT w Poznaniu i Warszawie wykonują badania wytrzymałościowe metali i stopów oraz tworzyw sztucznych i kompozytów. Do najczęściej stosowanych metod należą: próba rozciągania, próba udarności, pomiary twardości, badania makro- i mikroskopowe. Badania wykonywane są w temperaturach zarówno podwyższonych, jak i obniżonych. W ostatnim czasie w poznańskim laboratorium zmodernizowaliśmy maszynę wytrzymałościową. Pozwala ona obecnie na przeprowadzanie prób zmęczeniowych nisko- i wysokocyklowych, badań interakcji pełzanie-zmęczenie, a także pomiarów z zakresu mechaniki pękania. Badania mogą być prowadzone w temperaturach do 1000°C. Ponadto doposażyliśmy pracownię badawczą w Poznaniu w skaningowy mikroskop elektronowy najnowszej generacji. Wykorzystanie tego narzędzia istotnie zwiększy zakres możliwych do wykonania badań i ekspertyz. Dla przykładu nasi klienci będą mieli teraz dostęp do badań składu chemicznego w mikroobszarach.

Pozostając przy wątku badań wytrzymałościowych, chciałbym wspomnieć o działaniach związanych z rozwojem metody Small Punch Test (SPT). Jest to metoda badawcza, która pozwala na określenie właściwości wytrzymałościowych materiału dzięki wykorzystaniu minipróbek. Badanie polega na wciskaniu specjalnego wgłębniaka w niewielką próbkę o wymiarach wynoszących np. 8 mm średnicy i 0,5 mm grubości. Metoda ta pozwala m.in. na szacowanie granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie oraz odporności na pełzanie. Small Punch Test zyskuje coraz większe zainteresowanie wśród przedsiębiorców odpowiedzialnych za kluczowe elementy infrastruktury krytycznej w kraju. W ostatnim czasie wykonujemy coraz więcej tego typu badań dla zakładów energetyki ciepłej i przemysłowej oraz branży petrochemicznej.

Laboratorium badawcze w Poznaniu przystosowane jest do wykonywania specjalistycznych badań urządzeń technicznych i maszyn, tj. badań automatyki zabezpieczającej, badań bezpieczeństwa elektrycznego, badań urządzeń grzewczych na paliwa stałe, badań akustycznych. Zaplecze badawczo-rozwojowe oraz dogodne położenie, w sąsiedztwie trasy szybkiego ruchu, sprzyjają procesowi transportu obiektów do badań o znacznych rozmiarach. Ułatwia to obsługę niedostępnych wcześniej zleceń. Przykładem potwierdzającym zwiększone możliwości prowadzenia badań i pomiarów jest komora semibezodbiwoia z wyposażeniem do badań kompatybilności elektromagnetycznej (EMC – ang. Electromagnetic Compatibility). Poprzednia lokalizacja jednostki badawczej w Poznaniu, która miała liczne bariery architektoniczne, ograniczała znacznie liczbę zleceń możliwych do zrealizowania. Nowo zainstalowana komora do badań EMC pozwala na wykonywanie pomiarów obiektów o większych wymiarach i masie własnej, niż miało to miejsce wcześniej. Zwiększony został zakres pomiarowy częstotliwości z 3 GHz do 6 GHz.



Najwyższa jakość wykonywanych badań zależy w ogromnej mierze od personelu badawczego. Stosowana metodyka badań oraz wyspecjalizowana i doświadczona kadra to klucz do bezpieczeństwa. Jakże zatem cechy powinno mieć współczesne laboratorium badawcze, aby spełnić oczekiwania klientów?

Obserwujemy ciągle wzrost wymagań stawianych przez klientów. Wykonywanie badań z zastosowaniem najnowszych technik badawczych staje się często niewystarczające. Klienci oczekują od nas znalezienia przyczyn problemów pojawiających się podczas eksploatacji instalacji przemysłowych, urządzeń i wyrobów. Aby sprostać tym wymaganiom, nasza kadra musi posiadać wiedzę z wielu dziedzin. Oprócz inżynierii materiałowej i zasad budowy urządzeń technicznych, są to również: inżynieria procesowa, analizy wytrzymałościowe czy też mechanika pęknięcia. Ponadto konieczna jest znajomość tzw. dobrych praktyk inżynierskich, których nabycie wymaga wielu lat pracy w danym obszarze. Realizowane zadania wymagają często tworzenia multidyscyplinarnych zespołów.

Jednym z przykładów tego typu działań są analizy Fitness For Service. Procedury oceny opisane w standardzie API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service pozwalają na ocenę urządzeń, w których w trakcie eksploatacji wykryto różne rodzaje uszkodzeń. Zastosowanie odpowiednich kryteriów oceny pozwala stwierdzić, czy dane urządzenie może być dalej eksploatowane, czy też nie. Możliwe jest również oszacowanie pozostałej trwałości eksploatacyjnej.

Tak jak wspominałem wcześniej, zespół przeprowadzający tego typu ekspertyzy składa się ze specjalistów z kilku dziedzin. Dlatego też poza własnym rozwojem kompetencji w wielu obszarach, pracownicy laboratoryjni aktywnie angażują się w organizację szkoleń i wymianę wiedzy z pozostałymi pracownikami UDT.

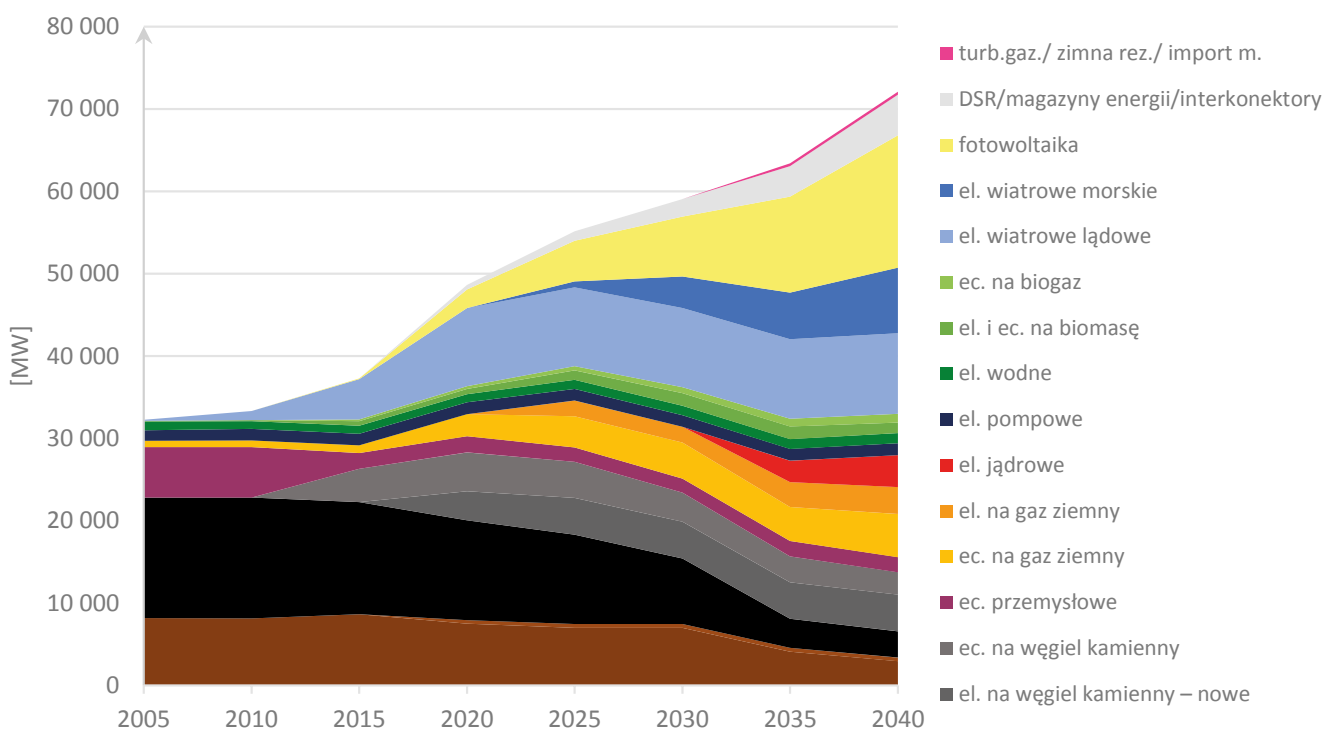
Otoczenie przemysłowe wciąż się rozwija, a we wszystkich branżach obserwuje się nie tylko zaawansowane rozwiązania inżynierskie, ale też wymagania związane z ekologią. Jakże wyzwania czekają na laboratoria UDT CLDT w przyszłości?

Stale monitorujemy zmiany zachodzące w przemyśle. Szczególne znaczenie dla laboratoriów UDT CLDT, jak i całej organizacji ma transformacja energetyczna. Niezależnie od dyskusji prowadzonych na ten temat zmiany w sposobie wytwarzania energii stają się faktem. Od kilku lat systematycznie rośnie udział Odnawialnych Źródeł Energii (OZE) w krajowym miksie energetycznym, co potwierdzają dane zaprezentowane w „Krajowym Planie w dziedzinie Energii i Klimatu do 2030 r.”

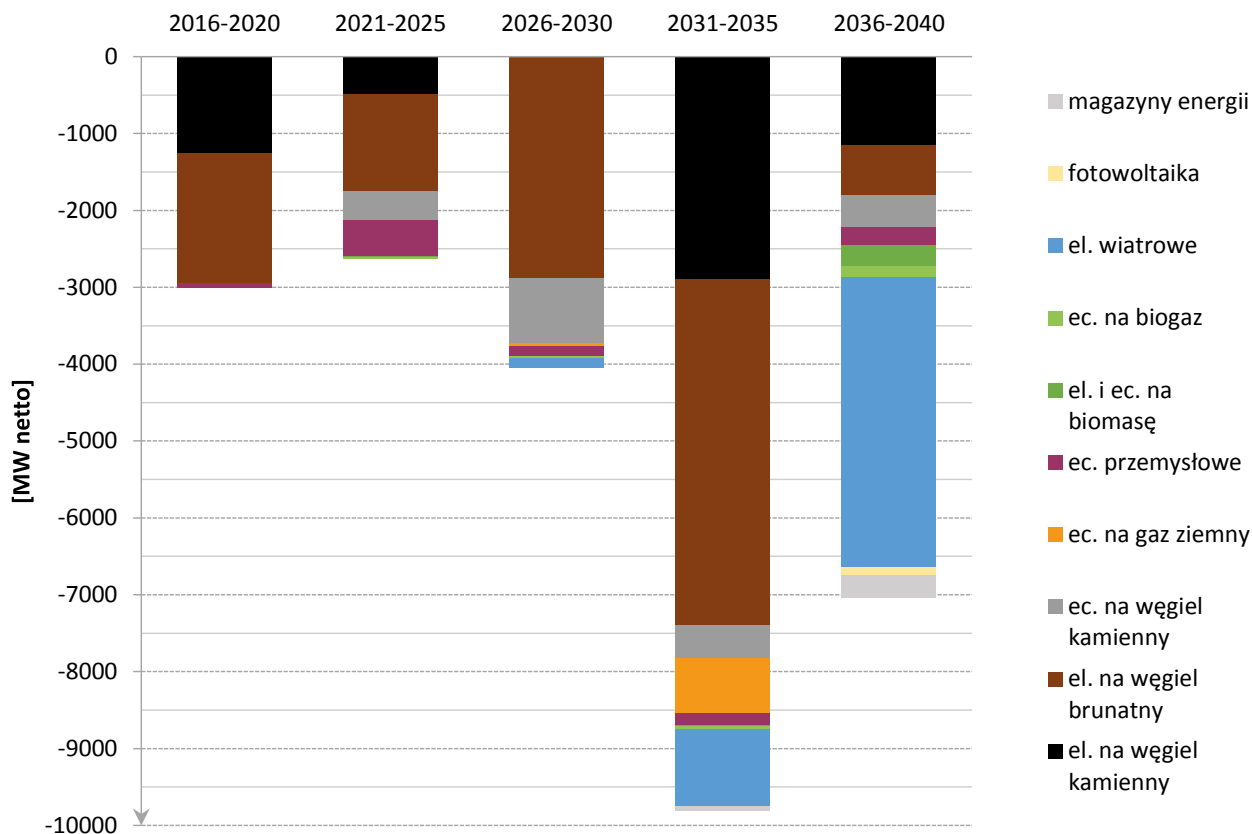
Analiza „Krajowego Planu w dziedzinie Energii i Klimatu do 2030 r.” pozwala prognozować, że produkcja energii elektrycznej w elektrowniach spalających węgiel kamienny i brunatny będzie maleć.

Prezentowane scenariusze wskazują zmniejszenie mocy wytwórczych zainstalowanych w elektrowniach węglowych (wyłączenie z eksploatacji), co będzie prowadzić do redukcji usług przeznaczonych dla tej gałęzi przemysłu.

Rozwój OZE sprawia jednak, że istnieje szansa na wdrożenie rozwiązań dla tego typu technologii. Dotychczas w obszarze badań nieniszczących prym wiodły badania metodą emisji akustycznej hydroakumulatorów zainstalowanych w siłowniach wiatrowych. W ostatnim czasie w UDT CLDT rozpoczęto pilotażowe badania diagnostyczne farm fotowoltaicznych za pomocą dronów wyposażonych w kamery termowizyjne. Nie są to na pewno jedyne rozwiązania możliwe do wykorzystania w energetyce wiatrowej i energetyce słonecznej, dlatego ciągle poszukujemy nowych.



Rys. 2. Moc osiągalna źródeł wytwarzania energii elektrycznej wg technologii
Źródło: Krajowy Plan w dziedzinie Energii i Klimatu do 2030 r.



Rys. 3. Prognoza trwałych odstawień jednostek wytwórczych w latach 2026–2040
 Źródło: Krajowy Plan w dziedzinie Energii i Klimatu do 2030 r.

Wiele krajowych dyskusji dotyczy wytwarzania, magazynowania i transportu zielonego wodoru. Warto przypomnieć, że o „kolorach” wodoru mówi się przez pryzmat sposobu jego wytwarzania. Mimo iż Polska należy do czołowych producentów w Europie, to wytwarzany w naszym kraju wodór – wodór szary – jest niepożądany. Jego synteza odbywa się z wykorzystaniem węglowodorów (najczęściej z gazu ziemnego). Podczas produkcji wodoru szarego dochodzi do emisji CO₂. Zgodnie z polityką klimatyczną Unii Europejskiej konieczna jest redukcja ilości dwutlenku węgla emitowanego do atmosfery. W przypadku wodoru zielonego wodór wytwarzany jest w wyniku hydrolizy wody. Energia elektryczna potrzebna do zasilania elektrolizerów powinna pochodzić z OZE. Taki sposób syntezy wodoru jest obecnie najbardziej oczekiwany, ponieważ nie wiąże się ze zwiększaniem zawartości CO₂ w środowisku. Proponowane jest, aby wodór zielony był wykorzystywany m.in. do zasilania samochodów wodorowych czy też ogrzewania gospodarstw domowych. Upowszechnienie tego rodzaju paliwa może mieć znaczny wpływ na krajowy przemysł, a zatem także na przyszłe obszary działalności UDT. Specjaliści UDT na bieżąco monitorują światowe trendy związane z diagnostyką urządzeń technicznych przeznaczonych do pracy w środowisku wodoru.

Mówiąc o energetyce, nie sposób nie wspomnieć o „Programie polskiej energetyki jądrowej”. Temat energetyki jądrowej w Polsce jest obecny od wielu lat. Aktualny program zakłada budowę i oddanie do eksploatacji elektrowni jądrowych o mocy zainstalowanej od 6 do 9 GW_e. Pierwszy z bloków ma zostać oddany do użytku w 2033 r. Dostarczenie technologii jądrowej do naszego kraju będzie wymagać znacznego poszerzenia kompetencji pracowników Urzędu Dozoru Technicznego, w tym również pracowników odpowiedzialnych za badania laboratoryjne.

Największą wartością Urzędu Dozoru Technicznego są ludzie, ich wiedza, doświadczenie i chęć do działania i doskonalenia. Polskie społeczeństwo

starzeje się. Starzeje się również kadra inżyniersko-techniczna zatrudniona w naszej organizacji. Praca w UDT jest bardzo wymagająca. Nasi pracownicy muszą posiadać bardzo wysokie kompetencje. Wiele zadań jest realizowanych w trudnych warunkach. Czynniki te sprawiają, że zatrudnienie i właściwe przeszkolenie nowych pracowników staje się coraz trudniejsze.

Najbliższe lata mogą być okresem wyężonej pracy. Jak zatem przygotowujecie się do przewidywanych zmian i wyzwań z nimi związanych?

Bardzo dużo uwagi poświęcamy kwestiom związanym z pozyskiwaniem nowych pracowników. Dzięki współpracy z uczelniami technicznymi coraz więcej ich absolwentów zaczyna swoją karierę w Urzędzie Dozoru Technicznego. Zależy nam na tym, aby nasza organizacja była dla nich miejscem, w którym będą chcieli pracować przez wiele lat. Kolejny istotny element to utrzymanie i rozwój kompetencji naszej kadry. Coraz więcej wagi przykładamy do skutecznego przekazywania wiedzy pomiędzy doświadczonymi pracownikami i tymi, którzy zaczynają swoją pracę w UDT.

Dodatkowo chętnie korzystamy z nowoczesnych rozwiązań, które pomagają w realizacji usług laboratoryjnych. Nasze badania i pomiary są coraz częściej wspomagane przez drony i roboty inspekcyjne. Z zainteresowaniem analizujemy nowoczesne rozwiązania dostępne na rynku. Staramy się testować i właściwie oceniać przydatność wybranych metod i technik badawczych do zastosowania w laboratoriach UDT CLDT.

Dziękuję za rozmowę i życzę wielu dalszych sukcesów.

SPÓJNOŚĆ POMIAROWA, WZORCOWANIE URZĄDZEŃ POMIAROWYCH



CLDT



MGR INŻ. ROBERT KRAJEWSKI

Starszy Specjalista ds. Metrologii
Wydział Metrologii i Zarządzania WPB
Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego
Urząd Dozoru Technicznego



W praktyce laboratoryjnej często spotykamy się z poniższymi pytaniami:

- Czy musimy wzorcować nasze urządzenie pomiarowe?
- Jak często musimy je wzorcować?
- Gdzie wykonywać wzorcowania, sprawdzenia?

Odpowiedź na pytanie „Czy musimy wzorcować nasze urządzenie pomiarowe?” brzmi: tak, jeżeli na podstawie wyniku pomiaru nasz Klient lub my podejmujemy decyzję dotyczącą obiektu mierzonego, potwierdzamy zgodność ze specyfikacją lub jest to wzorzec pomiarowy.

CEL I ZASADNOŚĆ WZORCOWANIA



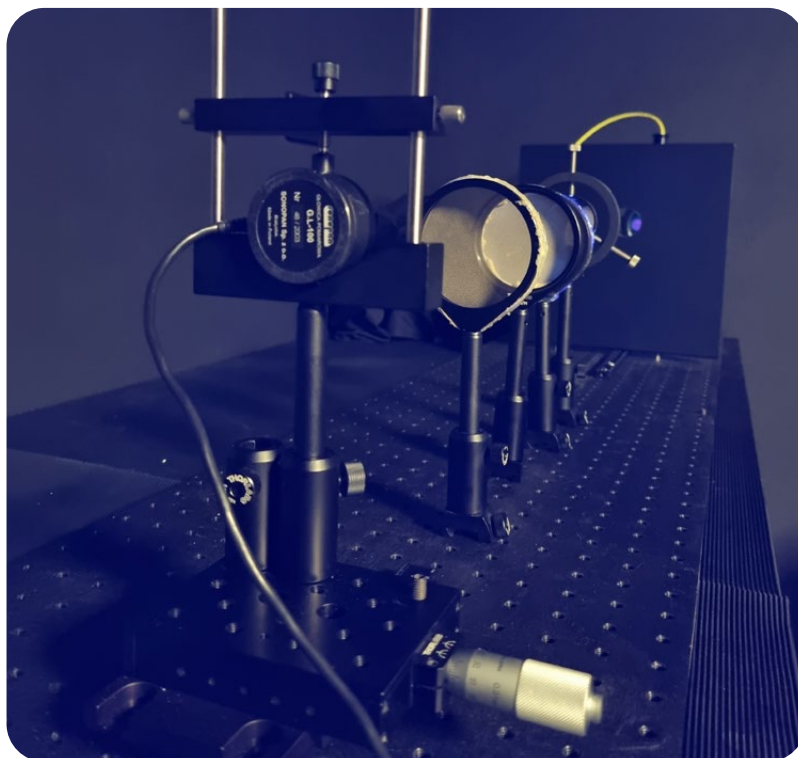
Rys. 1. Wzorcowanie ciśnieniomierza sprężynowego ciśnieniomierzem obciążnikowo-tłokowym

Rozwijając kwestię dotyczącą potrzeby wzorcowania, warto odnieść się do wymagań prawnych, normatywnych oraz różnego rodzaju wytycznych. Najczęściej wdrażaną normą w organizacjach jest norma ISO 9001 „Systemy zarządzania jakością. Wymagania” [1], która wymaga, jeżeli to istotne dla zagwarantowania zaufania co do ważności wyników pomiarów, zapewnienia spójności pomiarowej. Elementami zapewnienia spójności pomiarowej są realizowane w ustalonych odstępach czasu lub przed użyciem wzorcowania i/lub sprawdzenia urządzeń pomiarowych w odniesieniu do wzorców jednostek miary mających powiązanie z międzynarodowymi lub państwowymi wzorcami jednostek miary. Jeżeli nie ma takich wzorców, należy prowadzić zapisy dotyczące zastosowanej podstawy wzorcowania lub sprawdzania, a uzyskane wyniki powinny być odniesione do jednostek miary układu SI, wzorców pomiarowych odniesienia lub procedur.

Dokonując przeglądu kolejnych norm systemowych oraz dokumentów wydanych np. przez Polskie Centrum Akredytacji (PCA) i Urząd Dozoru Technicznego (UDT), można zauważyć podobny sposób formułowania wymagań dotyczących spójności pomiarowej, jak ma to miejsce w normie ISO 9001.

PRZYKŁADY

- Norma ISO 17025 „Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących” [2] poświęca punkt 6.5 potrzebie ustanowienia i utrzymywania spójności pomiarowej wyników.
- Norma ISO 17024 „Ocena zgodności. Ogólne wymagania dotyczące jednostek certyfikujących osoby” [3] wskazuje w punkcie 9.3.4, że używany w procesie egzaminacyjnym sprzęt powinien być sprawdzany lub wzorcowany, jeśli jest to właściwe.
- Norma ISO 17020 „Ocena zgodności. Wymagania dotyczące działania różnych rodzajów jednostek przeprowadzających inspekcję” [4] w punkcie 6.2.1 wskazuje potrzebę dysponowania właściwymi i adekwatnymi środkami technicznymi oraz wyposażeniem, pozwalającymi prowadzić działalność inspekcyjną w sposób kompetentny i bezpieczny. Ponadto w uwadze dopisano, że odpowiedzialność za status wzorcowania wyposażenia ponosi wyłącznie jednostka inspekcyjna.
- WUDT-LAB Wydanie 3/2022 „Warunki Techniczne Urzędu Dozoru Technicznego. Uznawanie Laboratoriów. Ocena kompetencji laboratoriów badawczych” [5]. W tym dokumencie możemy w kilku miejscach znaleźć wskazanie dotyczące konieczności zapewnienia spójności pomiarowej. Dokumentacja systemu zarządzania powinna zawierać procedurę zapewnienia i utrzymania spójności pomiarowej.
- PCA DA-06 „Polityka dotycząca zapewnienia spójności pomiarowej” [6] określa wymagania związane z ustanowieniem spójności pomiarowej wyników pomiarów. Postanowienia dokumentu dotyczą obszarów badań, wzorcowań oraz oceny zgodności, jeżeli są wykonywane pomiary. Dotyczy to m.in. inspekcji, produkcji materiałów odniesienia, organizacji badań biegłości.



Rys. 2. Wzorcowanie miernika widmowego natężenia napromienienia UV-A stosowanego w badaniach nieniszczących (NDT)

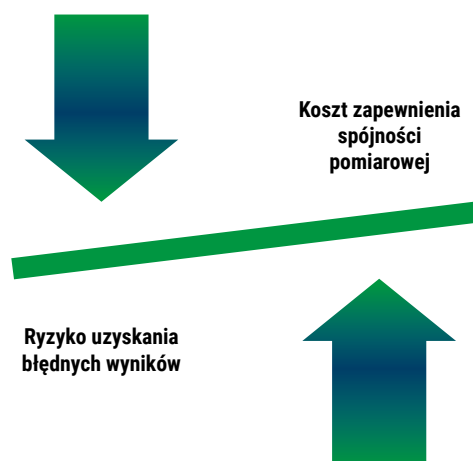
Nie ograniczając się do wymagań określonych w wyżej wymienionych dokumentach, widzimy, że organizacje, w których wykonywane są pomiary, powinny analizować i tam, gdzie to właściwe, wykonywać wzorcowania i/lub sprawdzenia urządzeń pomiarowych.

Odpowiadając twierdząco na pytanie: „Czy wzorcować, sprawdzać nasze urządzenie pomiarowe?”, należy również odpowiedzieć na pytanie: „Jak często i gdzie wykonywać wzorcowania, sprawdzenia?”.

CZĘSTOTLIWOŚĆ WZORCOWANIA

Wzorcowania i sprawdzenia powinno się wykonywać z odpowiednią częstością, aby zachować właściwą relację pomiędzy ryzykiem związanym z uzyskaniem błędnego wyniku a kosztem zapewnienia spójności pomiarowej.

Odpowiedź na pytanie dotyczące czasookresów wzorcowania można znaleźć w dokumencie ILAC G24:2022 „Wytyczne dotyczące wyznaczania odstępów czasu między wzorcowaniami wyposażenia pomiarowego” [7]. Konsekwencje decyzji dotyczących częstotliwości wzorcowania ponosi organizacja. W związku z tym decyzje należy podejmować zgodnie z indywidualnymi potrzebami i przeprowadzoną oceną ryzyka. Warto mieć na uwadze, że zmniejszenie częstości wzorcowania wpływa na wzrost ryzyka uzyskania błędnych wyników. Jedną z najważniejszych kwestii związanych z ustalaniem czasookresów wzorcowania jest oczekiwana dokładność wykonywanych pomiarów, a co za tym idzie, jakość urządzenia pomiarowego i jego stabilność.



Rys. 3. Ryzyko a koszt zapewnienia spójności pomiarowej

Dodatkowym źródłem informacji pomagającym w określeniu częstości wzorcowania są np. normy badawcze oraz normy dotyczące wzorcowania urządzeń pomiarowych.

PRZYKŁADOWE URZĄDZENIA POMIAROWE, DLA KTÓRYCH OKREŚLONO POTRZEBY I CZASOOKRESY WZORCOWANIA

- **Mierniki VIS (luksomierze do badań NDT) i miernik widmowego natężenia napromienienia UV-A**
W normie ISO 3059 [8] wskazano czasookres wzorcowania zgodny z zaleceniami producenta, jednak nie rzadziej niż raz na 12 miesięcy.
- **Wyposażenie do badań magnetyczno-proszkowych**
W standardzie ASTM E1444/E1444M-16 [9] wskazano 6-miesięczny okres pomiędzy wzorcowaniami lub sprawdzeniami. Zgodnie z zapisami zawartymi w ASTM czasookres ten może zostać skrócony lub wydłużony, jeżeli jest to uzasadnione względami technicznymi bądź niezawodnością urządzeń pomiarowych.
- **Twardościomierze przenośne UCI, Leeba oraz inne wzorcowane metodą pośrednią**
W normach DIN 50159-2 [10], ISO 16859-2 [11], ISO 6507-2 [12] wskazano czasookres pomiędzy wzorcowaniami jako nie rzadszy niż raz na 12 miesięcy.
- **Cięśnieniomierze sprężynowe i elektroniczne**
W normie ISO 13445-5 [13] wskazano potrzebę corocznego wzorcowania.
- **Maszyny wytrzymałościowe**
Zgodnie z zaleceniami normy ISO 7500-1 [14] wzorcowanie należy wykonywać nie rzadziej niż raz na 12 miesięcy.



Rys. 4. Wzorcowanie metodą pośrednią twardościomierza przenośnego UCI

LABORATORIA

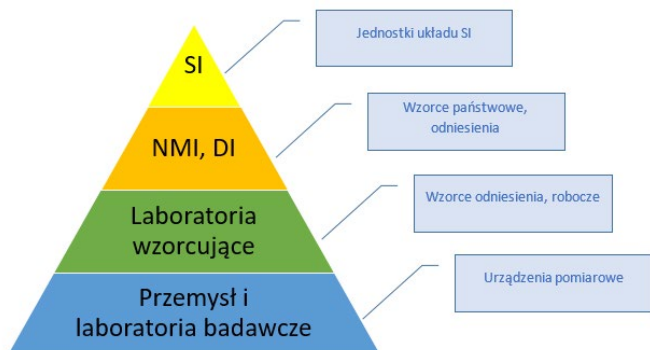
Gdzie należy wykonywać wzorcowania i sprawdzenia urządzeń pomiarowych?

- **Wzorcowania** powinny być wykonywane w akredytowanych laboratoriach wzorcujących, laboratoriach Krajowych Instytutów Metrologicznych (NMI – ang. National Metrology Institute) oraz laboratoriach Instytutów Desygnowanych (DI – ang. Designated Institutes), będących depozytariuszami wzorców państwowych.

Akredytowane laboratoria wzorcujące mają potwierdzone kompetencje w zakresie akredytacji, a laboratoria NMIs i DIs mają potwierdzone kompetencje, jeżeli ich usługi są ujęte w bazie danych BIPM KCDB (<https://www.bipm.org/kcdb/>).

- **Sprawdzenie** służy do potwierdzenia, że dane urządzenie pomiarowe, badawcze spełnia określone wymagania. Wykonywane jest tam, gdzie nie możemy lub nie mamy potrzeby wzorcowania, oraz jako dodatkowa czynność pomiędzy wzorcowaniami, służąca do potwierdzenia statutu wzorcowania. Laboratoria wykonujące sprawdzenia nie występują w żadnych rejestrach potwierdzających ich kompetencje. Dlatego należy opierać się na zaufaniu do wykonawców usługi. Często wyborem są laboratoria producentów urządzeń pomiarowych oraz laboratoria posiadające wdrożony system zarządzania wg ISO 17025, wykonujące usługi nieobjęte zakresem akredytacji.

Dobór laboratorium wzorcującego, nie ograniczając się do powyższych przykładów, zależy od wymagań Klienta i oczekiwanej niepewności pomiaru. Istotne są również wymagania jednostek certyfikujących systemu zarządzania lub osoby oraz wymagania jednostki udzielającej akredytacji.



Rys. 5. Źródła zapewnienia spójności pomiarowej



AP 136

W strukturze UDT funkcjonuje laboratorium wzorcujące posiadające akredytację na zgodność z normą PN-EN ISO/IEC 17025 – certyfikat akredytacji nr AP 136. Zakres akredytacji obejmuje wzorcowanie urządzeń pomiarowych z zakresu długości, fotometrii, ciśnienia, prędkości, siły, twardości oraz termometrii radiacyjnej i elektrycznej. Laboratorium wzorcujące UDT jako pierwsze w Polsce uzyskało akredytację w zakresie wzorcowania twardościomierzy przenośnych, luksomierzy do badań NDT oraz tachometrów cyfrowych dla prędkości liniowej.

Informacje o usługach realizowanych przez laboratorium wzorcujące UDT dostępne są na stronie www.udt.gov.pl → Obszary działania → Badania laboratoryjne i wzorcowania → Laboratorium wzorcujące UDT CLDT w Poznaniu [15].



Rys. 6. Siedziba laboratorium wzorcującego UDT CLDT w Poznaniu przy ul. Ostrowskiej 388

Literatura:

1. PN-EN ISO 9001:2015-10 Systemy zarządzania jakością – Wymagania
2. PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących
3. PN-EN ISO/IEC 17024:2012 Ocena zgodności – Ogólne wymagania dotyczące jednostek certyfikujących osoby
4. PN-EN ISO/IEC 17020:2012 Ocena zgodności – Wymagania dotyczące działania różnych rodzajów jednostek przeprowadzających inspekcję
5. WUDT-LAB Wydanie 3/2022 Warunki Techniczne Urzędu Dozoru Technicznego. Uznawanie Laboratoriów. Ocena kompetencji laboratoriów badawczych
6. PCA DA-06 Wydanie 8 z 18.06.2021 Polityka dotycząca zapewnienia spójności pomiarowej
7. ILAC G24:2022 Wytyczne dotyczące wyznaczania odstępów czasu między wzorcowaniami wyposażenia pomiarowego
8. PN-EN ISO 3059:2013-06 Badania nieniszczące – Badania penetracyjne i badania magnetyczne proszkowe – Warunki obserwacji
9. ASTM E1444/E1444M – 16 Standard Practice for Magnetic Particle Testing
10. DIN 50159-2:2022-06 Metallic materials - Hardness testing with the UCI method - Part 2: Verification and calibration of the testing devices
11. PN-EN ISO 16859-2:2015-12 Metale – Pomiar twardości sposobem Leeba – Część 2: Sprawdzanie i wzorcowanie twardościomierzy
12. PN-EN ISO 6507-2:2018-05 Metale – Pomiar twardości sposobem Vickersa – Część 2: Sprawdzanie i wzorcowanie twardościomierzy
13. PN-EN 13445-5:2021-10 Nieogrzewane płomieniem zbiorniki ciśnieniowe – Część 5: Kontrola i badania
14. PN-EN ISO 7500-1:2018-05 Metale – Wzorcowanie i sprawdzanie statycznych jednoosiowych maszyn wytrzymałościowych – Część 1: Maszyny wytrzymałościowe rozciągające/ściskające – Wzorcowanie i sprawdzanie układu pomiarowego siły
15. Laboratorium wzorcujące UDT CLDT w Poznaniu <https://www.udt.gov.pl/o-centralnym-laboratorium-dozoru-technicznego-cldt/laboratorium-wzorcujuce-udt-cldt-w-poznaniu>

CERTYFIKACJA PERSONELU WEDŁUG PN-EN ISO 9712:2022-09



MGR INŻ. MAGDALENA MAJ-SOBCZAK

Główny Specjalista ds. Certyfikacji Osób
Departament Certyfikacji i Oceny Zgodności
Urząd Dozoru Technicznego



Badania nieniszczące (ang. Non-Destructive Testing, NDT) to grupa nieinwazyjnych metod diagnostycznych, które pozwalają na ocenę właściwości materiałów, komponentów i zespołów bez powodowania zmian w ich właściwościach użytkowych. Metody te są szeroko stosowane w wielu branżach, takich jak przemysł lotniczy, motoryzacyjny, budowlany, rafineryjny, energetyczny i zbrojeniowy, a także w diagnostyce medycznej, badaniach archeologicznych czy nawet ochronie środowiska.

CERTYFIKACJA OSÓB – DEFINICJA, PROCES CERTYFIKACJI

Certyfikacja personelu badań nieniszczących jest istotnym elementem zapewnienia jakości w przemyśle i służy do oceny kompetencji osób wykonujących badania NDT. Celem procesu jest zapewnienie, że personel posiada odpowiednie umiejętności i wiedzę do przeprowadzania badań nieniszczących w sposób niezawodny i skuteczny. Certyfikacja jest konieczna w wielu branżach, aby spełniać ściśle wymagania jakościowe i bezpieczeństwa.

Dzięki procesowi certyfikacji możemy mieć pewność, że poddana mu osoba spełnia wymagania programu certyfikacji. Definicję programu certyfikacji znajdziemy w normie PN-EN ISO/IEC 17024 „Ocena zgodności. Ogólne wymagania dotyczące jednostek certyfikujących osoby” [1] – kluczowej normie stanowiącej podstawę działania jednostek certyfikujących osoby (JCO). Dzięki spełnieniu zapisów normy PN-EN ISO/IEC 17024, potwierdzonemu przez akredytację – akredytacja jest potwierdzeniem kompetencji podmiotu (jednostki certyfikującej wyroby, usługi, osoby, systemy), laboratorium (badawczego, wzorcującego etc.), jednostki inspekcyjnej do działań w określonym zakresie.

Zakres akredytacji jest załącznikiem do certyfikatu akredytacji i precyzuje obszar potwierdzonych kompetencji [2]. Proces akredytacji daje nam pewność, że dana jednostka prowadzi swoje procesy w sposób kompetentny, czyli bezstronnie, niezależnie, obiektywnie, według takich samych dla każdej osoby przystępującej do certyfikacji wymagań, przez odpowiedni personel, przy użyciu odpowiednich zasobów.

AKREDYTACJA JCO UDT-CERT

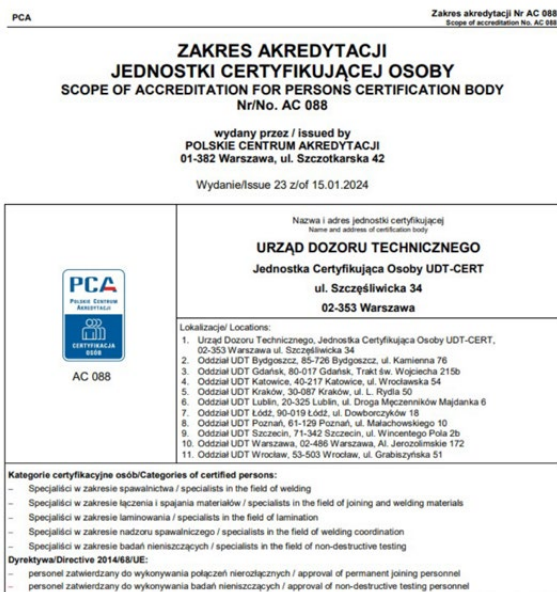
Jednostka UDT-CERT w zakresie certyfikacji osób posiada akredytację od 2002 r. Numer akredytacji to AC 088, a jej zakres obejmuje m.in.:

- specjalistów w zakresie badań nieniszczących,
- personel uprawniony do wykonywania badań nieniszczących połączeń nierozłącznych (dyrektywa 2014/68/UE).



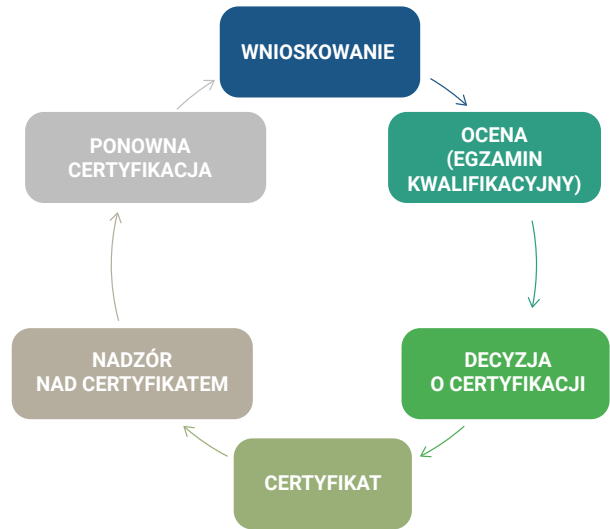
AC 088

Dla łatwiejszego zrozumienia zagadnień związanych z certyfikacją warto zapoznać się z kilkoma definicjami zaprezentowanymi w normie PN-EN ISO/IEC 17024 [3].



• PROCES CERTYFIKACJI

Działania, łącznie z wnioskowaniem, oceną, decyzją w sprawie certyfikacji, ponownej certyfikacji i wykorzystaniem certyfikatów oraz znaków lub logo, za pomocą których jednostka certyfikująca ustala, że dana osoba spełnia wymagania certyfikacyjne, to:



Rysunek 1. Przebieg procesu certyfikacji

• PROGRAM CERTYFIKACJI

Kompetencje i inne wymagania dotyczące specyficznych kategorii zawodowych lub umiejętności osób

• WYMAGANIA CERTYFIKACYJNE

Zbiór wyspecyfikowanych wymagań, łącznie z wymaganiami programu, które mają być spełnione w celu ustanowienia lub utrzymania certyfikacji

• KOMPETENCJE

Zdolność stosowania wiedzy i umiejętności w celu osiągnięcia zamierzonych wyników

• KWALIFIKACJE

Wykazane wykształcenie, szkolenie i doświadczenie zawodowe, jeśli ma to zastosowanie

• OCENA

Proces, w którym oceniane jest spełnienie przez osobę wymagań programu certyfikacji

• EGZAMIN

Działania, będące częścią oceny, które służą do pomiaru kompetencji kandydata za pomocą jednego lub więcej sposobów, takich jak egzamin pisemny, ustny, praktyczny i obserwacja, tak jak to określono w programie certyfikacji

Certyfikacja personelu badań nieniszczących jest prowadzona zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 9712:2022-09. Badania nieniszczące. Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących [4] – jest to standard, który reguluje zasady certyfikacji personelu NDT w Europie.

Norma określa wymagania dotyczące kwalifikacji i certyfikacji personelu, który wykonuje przemysłowe badania nieniszczące (NDT) w dziesięciu metodach, a także szczegółowe zasady dotyczące przebiegu egzaminów oraz ponownej certyfikacji.

W Urzędzie Dozoru Technicznego (JCO UDT-CERT) prowadzimy certyfikację w metodach, w stopniu 1, 2 i 3:

- badania emisją akustyczną,
- badania magnetyczno-proszkowe,
- badania penetracyjne,
- badania radiograficzne oraz ocenę i interpretację radiogramów,
- badania ultradźwiękowe oraz ultradźwiękowy pomiar grubości,
- badania wizualne,
- badania magnetyczne lin stalowych.

CELE CERTYFIKACJI

Cele certyfikacji personelu badań nieniszczących według PN-EN 9712:2022-09 są zróżnicowane i obejmują niżej wskazane aspekty.

● ZAPEWNIENIE JAKOŚCI

Głównym celem jest zapewnienie, że badania NDT są przeprowadzane przez wykwalifikowanych i kompetentnych specjalistów, co zwiększa dokładność i wiarygodność wyników badań.

● BEZPIECZEŃSTWO

Certyfikacja pomaga zwiększyć bezpieczeństwo operacyjne poprzez wykrywanie wad i niedoskonałości w materiałach oraz konstrukcjach.

● STANDARYZACJA

Wprowadzenie jednolitych standardów i procedur gwarantuje spójność i porównywalność wyników badań niezależnie od miejsca ich przeprowadzania.

● ZAUFANIE KLIENTÓW

Certyfikowani specjaliści wzbudzają większe zaufanie klientów i partnerów biznesowych, co jest kluczowe w branżach wymagających wysokiego poziomu bezpieczeństwa i precyzji.



STOPNIE CERTYFIKACJI

UPOWAŻNIENIA OSÓB CERTYFIKOWANYCH W DANYM STOPNIU DO

Stopień 1	Stopień 2	Stopień 3
<ul style="list-style-type: none"> ● nastawiania aparatury, ● wykonywania badań, ● rejestrowania wyników badań i ich klasyfikowania na podstawie pisemnych kryteriów, ● raportowania wyników badań. 	<ul style="list-style-type: none"> ● doboru techniki badania dla stosowanej metody badania, ● określania ograniczeń w stosowaniu metody badania, ● przekładania norm i specyfikacji badań nieniszczących do odpowiednich instrukcji badań, ● nastawiania i weryfikowania ustawień wyposażenia, ● wykonywania i nadzorowania badań, ● interpretacji i oceny wyników zgodnie z normami, przepisami lub specyfikacjami, ● przygotowania pisemnych instrukcji badań nieniszczących, ● wykonywania i nadzorowania wszystkich obowiązków na 2 stopniu lub niższym, ● zapewniania doradztwa dla personelu o kwalifikacjach 2 stopnia lub niższego, ● zestawienia i opracowania protokołów z wynikami badań nieniszczących. 	<ul style="list-style-type: none"> ● przyjęcia pełnej odpowiedzialności za wykonywanie i kierowanie operacjami NDT, ● ustalania, sprawdzania oraz zatwierdzania instrukcji oraz procedur badań nieniszczących, ● interpretowania norm, przepisów, specyfikacji, procedur, ● wyznaczania konkretnych metod badania, stosowania procedur i instrukcji badań nieniszczących, które mają być zastosowane, ● wykonywania i nadzorowania wszystkich zadań na wszystkich stopniach, ● zapewniania doradztwa i nadzoru dla personelu NDT na wszystkich stopniach.

SEKTORY ZAKRESU CERTYFIKACJI

Zostały również określone sektory wyrobów oraz przemysłowe, w których prowadzone są procesy oceny kompetencji:

- 1 – odlewy (c),
- 2 – odkuwki (f),
- 3 – złącza spawane (w),
- 4 – rury różnych średnic, włączając wyroby płaskie do produkcji rur spawanych (t),
- 5 – wyroby przerabiane plastycznie (wp),
- 6 – wytwarzanie (obejmujący: 1 – odlewy (c), 2 – odkuwki (f), 4 – rury różnych średnic, włączając wyroby płaskie do produkcji rur spawanych (t), 5 – wyroby przerabiane plastycznie (wp)),
- 7 – badania przed- i eksploatacyjne, w tym wytwarzanie (obejmujący 1 – odlewy (c), 2 – odkuwki (f), 3 – złącza spawane (w), 4 – rury różnych średnic, włączając wyroby płaskie do produkcji rur spawanych (t), 5 – wyroby przerabiane plastycznie (wp))

oraz w:

sektorze [8] – utrzymanie ruchu kolei w czterech metodach, w podsektorze 8[0]: UT – ultradźwiękowej, certyfikacja tylko w dwóch stopniach kwalifikacji (1 i 2 stopień kwalifikacji).

NOWE WYDANIE NORMY PN-EN ISO 9712

W 2022 r. zostało opublikowane nowe wydanie normy PN-EN ISO 9712:2022-09.

Najistotniejsze zmiany w PN-EN ISO 9712:2022-09 w odniesieniu DO PN-EN ISO 9712:212

- metody badań niszczących: zaktualizowano metody badań niszczących, w których można ubiegać się o certyfikat – usunięto możliwość certyfikacji w met. badań termograficznych w podczerwieni na rzecz badań termograficznych, dodano zapis dot. badań wizualnych – są to badania z wyłączeniem bezpośrednich badań wizualnych wykonywanych podczas stosowania innej metody NDT, dodano zapis dot. certyfikacji w innych metodach lub technikach NDT, wykluczono zastosowania w dziedzinie medycyny,
- definicje: zaktualizowano definicje: wnioskujący, kandydat, certyfikat, pracodawca, egzaminator, kwalifikacja, odnowienie, dodano nowe definicje: cykl certyfikacji, proces certyfikacji, wymagania certyfikacyjne, kompetencje, egzamin, część egzaminu, proces psychometryczny, system uzyskiwania punktów, poświadczający, działalność zawodowa,
- odpowiedzialność:
 - dot. jednostki certyfikującej dodano zapis: o niezależności jednostki certyfikującej od konfliktu interesu, konieczności publikacji zakresu programu certyfikacji i ogólnego opisu procesu certyfikacji, odpowiedzialności za udzielanie, przedłużenie, zawieszanie, cofnięcie lub przedłużenie ważności certyfikacji, możliwości zatwierdzania oś. szkoleniowych, możliwości delegowania czynności na autoryzowaną jednostkę kwalifikującą, konieczności ustalenia procedur powoływania egzaminatorów, osób nadzorujących egzamin, procedury uznawania wykształcenia, warunków nadzoru nad czynnościami związanymi z praktyką przemysłową, zasad dot. systemu uznawania punktów, możliwości określenia minimalnego wieku kandydatów, konieczności prowadzenia i aktualizowania banku pytań oraz próbek egzaminacyjnych,
 - dot. autoryzowanej jednostki kwalifikującej dodano zapisy: dot. przeprowadzania kwalifikacji kandydatów, konieczności dostarczania jednostce certyfikującej wyników kwalifikacji oraz utrzymywania odpowiednich kwalifikacji i zapisów z egzaminów,
 - dot. ośrodków egzaminacyjnych: zaktualizowano zapisy dot. posiadania niezbędnych środków do przygotowania i prowadzenia egzaminów, dodano możliwość korzystania z pomieszczeń zewnętrznych, dodano zapis, w jakich strukturach może działać ośrodek egzaminacyjny,
 - pracodawca: dodano zapis o konieczności prowadzenia dokumentacji dot. ciągłości stosowania metody NDT,
 - egzaminator: nowy punkt w normie – dodano zapisy dot. wymagań dla egzaminatorów,
 - poświadczający: nowy punkt w normie – dodano zapisy dot. wymagań dla poświadczającego
- kwalifikacja:
 - dodano możliwość określenia minimalnego wieku kandydata,
 - dot. szkolenia – dodano możliwość prowadzenia szkoleń teoretycznych zdalnie, we własnym zakresie oraz w formie bezpośredniej, zaktualizowano minimalny czas szkoleń,
 - dot. praktyki – zaktualizowano minimalny czas praktyki zawodowej oraz zasady zmniejszania wymaganej praktyki,
 - dot. wzroku – zaktualizowano zapisy dot. ostrości widzenia bliskiego oraz widzenia barw (badanie raz na 5 lat) oraz zapis dot. personelu przeprowadzającego badanie wzroku
- egzaminy:
 - zasady ogólne – zaktualizowano zapisy dot. procesu opracowywania i wyboru pytań egzaminacyjnych oraz próbek, a także zasad porównywania i monitorowania wyników egzaminów, dodano zapis o ważności egzaminów,
 - zawartość – zaktualizowano zawartość egzaminu na st. 1 oraz st. 2 (instrukcja jako oddzielna część), zaktualizowano czasy trwania poszczególnych części egzaminu, dodano zapis dot. korzystania z materiałów egzaminacyjnych,
 - ocena egzaminu na 1 i 2 stopień – dodano zapisy dot. instrukcji i sposobu jej oceniania (współczynniki wagowe), zaktualizowano współczynniki wagowe dot. egzaminu praktycznego oraz zapisy dot. pozytywnego wyniku egzaminu,
 - powtarzanie egzaminu – zaktualizowano zapisy i dodano konieczność ukończenia dodatkowego szkolenia w przypadku negatywnej oceny ze wszystkich egzaminów poprawkowych.

- certyfikacja:
 - certyfikaty – zaktualizowano zapisy dot. minimalnej zawartości danych w certyfikacie, dodano możliwość wydruku certyfikatu ze strony internetowej oraz wydawania certyfikatów cyfrowych,
 - warunki certyfikacji – określono maksymalny okres ważności certyfikatu oraz zapisy dot. ważności certyfikatu w zależności od badania wzroku,
 - udzielanie certyfikacji – zaktualizowano zapisy, w tym zapis o początku ważności certyfikacji,
 - dodano zapisy dot. rozszerzania zakresu certyfikacji, zawieszania, cofania i wznawiania certyfikacji,
 - zaktualizowano zasady dot. wydawania certyfikatów na podstawie dokumentów wydanych z innych jednostek
- odnowienie:
 - dodano zapisy dot. konieczności zdania egzaminu praktycznego lub spełnienia wymagań systemu uznawania punktów,
 - dodano zapisy dot. zasad składania wniosku o odnowienie oraz dat odnowienia certyfikacji
- recertyfikacja:
 - w przypadku recertyfikacji certyfikatu 1 i 2 stopnia uszczegółowiono zapisy dot. wymaganego potwierdzenia ciągłości praktyki,
 - w przypadku recertyfikacji certyfikatu 1 i 2 stopnia dodano zapisy dot. egzaminów poprawkowych recertyfikujących oraz zasad w przypadku niezdania 2 egzaminów poprawkowych,
 - w przypadku recertyfikacji 3 stopnia dodano zapisy dot. systemu uznawania punktów,
 - w przypadku recertyfikacji 3 stopnia uszczegółowiono zapisy dot. zasad postępowania, gdy osoba certyfikowana nie spełnia warunków odnowienia
- sektory:
 - sektory wyrobu podzielono na materiały metalowe oraz materiały kompozytowe (dodano zapisy o materiałach kompozytowych)
- próbki dla elementu egzaminu praktycznego:
 - dodano zapis o konieczności przetestowania jednej lub więcej próbek sektorowych podczas egzaminu praktycznego,
 - dodano zapis, że każda próbka powinna mieć inny charakter,
 - uściślono zasady egzaminu praktycznego związanego z sektorem wyrobu – konieczność przebadania min. 2 próbek (co najmniej 1 dla każdego sektora wyrobu),
 - uściślono zasady egzaminu praktycznego związanego z sektorem przemysłowym – konieczność przebadania min. 2 próbek reprezentatywnych dla sektora przemysłowego,
 - w przypadku metody RT 1 i 2 stopnia – zasada wykonania zdjęć rtg min. 2 próbek (os. z certyfikatem RT1 ubiegająca się o certyfikat RT2 min. 1 próbka) + interpretacja zestawu radiogramów (min. 10 obrazów filmowych lub 10 zdjęć cyfrowych),
 - w przypadku metody LT dodano zapis o wykonaniu badania min. 1 próbki dla każdej techniki,
 - w przypadku certyfikacji ograniczonych w stosowaniu dodano zapis o możliwości zmniejszenia próbek do 50% na jeden sektor
- ustrukturyzowany system punktów dla odnowienia 1, 2 i 3 stopnia oraz dla recertyfikacji 3 stopnia:
 - zmieniono tabelę dot. systemu uznawania punktów,
 - uszczegółowiono zasady weryfikacji punktów przedstawionych przez kandydata – zasady uznawania dowodów
- ocena elementów egzaminu praktycznego:
 - zmieniono wytyczne dot. procentowych współczynników wagowych egzaminu praktycznego dla 1 i 2 stopnia,
 - zmieniono wytyczne dot. współczynników wagowych dla pisemnej instrukcji dla 2 stopnia
- wymagania szkoleniowe dla technik:
 - dodano wymagania (szkolenie + minimalne wymagania kwalifikacyjne) dotyczące technik dla metody UT, MT, RT
- powiązanie normy z zasadniczymi wymaganiami dyrektywy UE 2014/68/UE:
 - zaktualizowano powiązania normy z dyrektywą

PROCES CERTYFIKACJI I PONOWNEJ CERTYFIKACJI

Proces certyfikacji personelu badań nieniszczących obejmuje kilka etapów.

Zgodnie z normą PN-EN ISO 9712 osoba ubiegająca się o certyfikację musi spełnić wymagania wstępne, by móc przystąpić do procesu oceny swoich kompetencji:

- posiadać odpowiednie szkolenie, przy czym norma przyjęła założenie, że kandydat posiada umiejętności z zakresu matematyki i wiedzę o materiałach oraz procesach, które można potwierdzić poprzez odpowiednie zdobyte wcześniej wykształcenie,
- wykazać się odpowiednią praktyką przemysłową w danej metodzie, stopniu oraz sektorze (wyrobu lub przemysłowym) zastosowań badań nieniszczących,
- przedstawić dowód pozytywnego wyniku badania dotyczącego zdolności widzenia.

PROCES OCENY KOMPETENCJI JEST ZALEŻNY OD STOPNIA KWALIFIKACJI.

● Stopień 1

część ogólna (test) – część specjalistyczna (test) – część praktyczna

● Stopień 2

część ogólna (test) – część specjalistyczna (test) – część praktyczna
– instrukcja

● Stopień 3

● Egzamin podstawowy:

- Część A Wiedza techniczna (test)
- Część B Wiedza o Jednostce Certyfikującej (test)
- Część C Wiedza o metodach (test)

● Metoda główna:

- Część D Część ogólna (test)
- Część E Część specjalistyczna (test)
- Część F Procedura

Każda z części egzaminu powinna zawierać odpowiednią liczbę pytań lub próbek oraz obejmować zagadnienia określone w sylabusach według wymagań ISO/TS 25107 [5]. W celu zapewnienia obiektywnej oceny kompetencji osób ubiegających się o certyfikację norma określiła kryteria oceny poszczególnych elementów egzaminu.

Kandydat spełniający wszystkie wymagania certyfikacyjne powinien być certyfikowany, a dowód tej certyfikacji powinien być udostępniany przez jednostkę certyfikującą poprzez wydanie certyfikatów w formie papierowej, certyfikatów cyfrowych i/lub poprzez elektroniczne załadowanie i wyświetlanie odpowiednich informacji w bazie danych na stronie internetowej jednostki certyfikującej. Każda z jednostek certyfikujących ma obowiązek publikacji wykazów osób certyfikowanych (z uwzględnieniem przepisów dot. publikacji danych wrażliwych).

WAŻNOŚĆ CERTYFIKATU

Okres ważności certyfikatu to maksymalnie 5 lat.

Warunkiem ważności certyfikatu jest coroczna kontrola zdolności widzenia oraz wykonywanie badań bez tzw. istotnej przerwy – „nieobecność lub zmiana działalności, która uniemożliwia osobie certyfikowanej pełnienie obowiązków odpowiednich do stopnia w metodzie i sektorze (-ach) określonym(-ych) zakresem certyfikacji, w przypadku gdy okres ciągłej przerwy przekracza jeden rok albo co najmniej dwie przerwy przekroczone łącznie dwa lata. Przy obliczaniu przerwy nie są brane pod uwagę ustawowe urlopy lub okresy nieobecności spowodowane chorobą lub szkoleniami, trwające krócej niż trzydzieści dni”.

Przed upływem ważności certyfikatu osoba certyfikowana powinna złożyć wniosek o odnowienie (przed zakończeniem okresu ważności po pierwszej certyfikacji i po recertyfikacji) lub recertyfikację (przed upływem każdego drugiego okresu ważności).

Norma wymaga, aby każda osoba ubiegająca się o ponowną certyfikację przedstawiła jednostce certyfikującej:

- a) dokumentację potwierdzającą zadowalające wyniki badania ostrości widzenia z bliska przeprowadzonego w czasie ostatnich 12 miesięcy,
- b) dokumentację potwierdzającą zadowalające wyniki badania zdolności widzenia barw i/lub postrzegania skali szarości wykonanego w czasie ostatnich 60 miesięcy,
- c) weryfikowalną dokumentację potwierdzającą ciągłą zadowalającą działalność zawodową bez istotnej przerwy w metodzie oraz sektorze/sektorach, w których wnioskowane jest odnowienie certyfikatu.

W przypadku odnowienia dodatkowym warunkiem jest:

- zdanie z wynikiem pozytywnym elementu egzaminu praktycznego zgodnie z punktem 11.2.2 normy PN-EN ISO 9712, przy czym egzamin musi obejmować co najmniej 50% próbek egzaminacyjnych lub
- pomyślne spełnienie wymagań systemu uznawania punktów podanych w punkcie 10.2 i Załączniku C normy PN-EN ISO 9712.

STOPNIE 1 i 2	W przypadku recertyfikacji 1 i 2 stopnia należy dodatkowo zdać z wynikiem pozytywnym egzamin, który powinien obejmować badanie próbek egzaminacyjnych odpowiednich do zakresu recertyfikacji oraz, w przypadku 2 stopnia, opracowanie pisemnej instrukcji badań odpowiedniej do stosowania przez personel 1 stopnia.
STOPNIE 3	Osoba recertyfikująca się w stopniu 3 ma możliwość dokonania wyboru sposobu ponownej certyfikacji – może przystąpić do egzaminu pisemnego (test dotyczący zastosowania metody badawczej w danym sektorze oraz test dotyczący wymagań programu certyfikacji jednostki certyfikującej) lub spełnić wymagania systemu uzyskiwania punktów.

KORZYŚCI Z CERTYFIKACJI WEDŁUG NORMY PN-EN ISO 9712:2022-09

Certyfikacja według normy PN-EN ISO 9712:2022-09 zapewnia, że personel przeprowadzający badania nieniszczące jest zdolny do wykonywania tych czynności w sposób niezawodny i efektywny. Certyfikacja ma na celu weryfikację zarówno teoretycznej, jak i praktycznej wiedzy, a także doświadczenia personelu.

Mając certyfikowany personel, organizacje mogą być pewne, że badania są przeprowadzane zgodnie z najwyższymi standardami, co minimalizuje ryzyko błędów i potencjalnych awarii konstrukcyjnych. Organizacje mogą minimalizować ryzyko przestojów i awarii wynikających z niezauważonych wad materiałowych czy konstrukcyjnych. Poza tym certyfikacja zwiększa wiarygodność i zaufanie klientów oraz może być wymaganiem kontraktowym w wielu branżach.

Dla personelu posiadanie certyfikatu może się wiązać z rozwojem zawodowym, ponieważ certyfikacja umożliwia ciągłe doskonalenie umiejętności i wiedzy, a samo posiadanie certyfikatu zwiększa wiarygodność i prestiż zawodowy specjalistów NDT oraz poprawia mobilność zawodową na rynku europejskim i międzynarodowym.

Literatura:

1. PN-EN ISO/IEC 17024 „Ocena zgodności. Ogólne wymagania dotyczące jednostek certyfikujących osoby”
2. Polski Komitet Normalizacyjny – Czym jest akredytacja? Czym jest akredytacja i jakich podmiotów dotyczy? | Polski Komitet Normalizacyjny (pkn.pl)
3. PN-EN ISO/IEC 17024 Ocena zgodności. Ogólne wymagania dotyczące jednostek certyfikujących osoby PN-EN ISO/IEC 17024:2012 - wersja polska (pkn.pl)
4. PN-EN ISO 9712:2022-09 Badania nieniszczące. Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących PN-EN ISO 9712:2022-09 - wersja polska (pkn.pl)
5. ISO/TS 25107 Non-destructive testing – NDT training syllabuses ISO/TS 25107:2019 - Non-destructive testing – NDT training syllabuses
6. Definicja 3.38 PN-EN ISO 9712:2022-09 Badania nieniszczące. Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących

ZNACZENIE LABORATORIÓW UZNANYCH DLA DOZORU TECHNICZNEGO



MGR INŻ. ROBERT CHUDZIK

Główny Specjalista ds. Rozwoju Badań Laboratoryjnych
Wydział Badań Materiałowych i Ekspertyz
Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego
Urząd Dozoru Technicznego

Urząd Dozoru Technicznego realizuje zadania związane z wykonywaniem dozoru technicznego w zakresie określonym w ustawie z dnia 21 grudnia 2000 r. o dozorze technicznym [1]. Zapleczem badawczo-ekspertyzowym UDT jest Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego (CLDT). Wyniki badań prowadzonych przez CLDT wykorzystują inspektorzy UDT podczas wykonywania czynności dozoru technicznego.

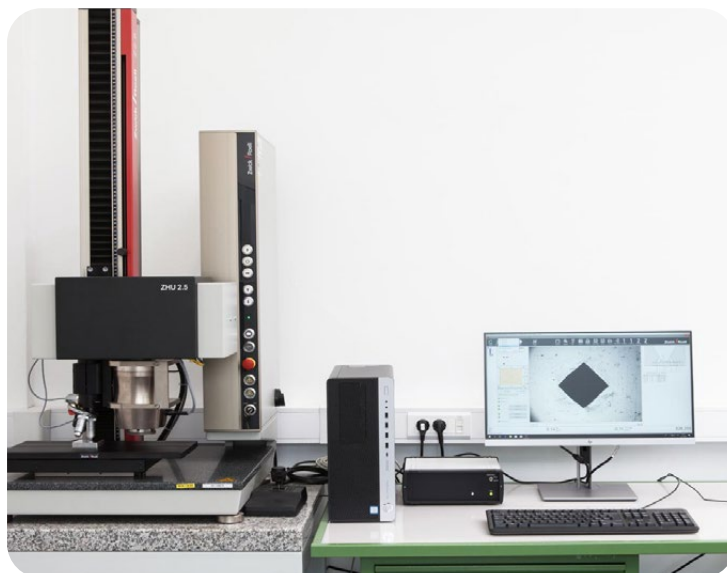
Ustawa o dozorze technicznym stwarza również możliwość wykorzystywania wyników badań wykonywanych przez laboratoria uznane. Wymagania, jakie powinny spełniać laboratoria uznane, oraz zasady przeprowadzania procesów uznawania laboratoriów badawczych i nadzoru nad tymi laboratoriami zostały określone w warunkach technicznych Urzędu Dozoru Technicznego WUDT-LAB 3/2022 „Uznawanie laboratoriów. Ocena kompetencji laboratoriów badawczych” [2]. W roku 2024 opracowano i opublikowano na stronie internetowej UDT przewodnik dotyczący stosowania WUDT-LAB 3/2022 [3]. Przewodnik objaśnia pojęcia i wymagania zawarte w WUDT-LAB 3/2022 w celu zapewnienia jednolitego sposobu ich interpretowania i stosowania. Artykuł przybliży czytelnikowi rolę laboratoriów uznanych w systemie zapewnienia bezpieczeństwa urządzeń technicznych.



KOMPETENCJE LABORATORIÓW UZNANYCH

Wykonywanie badań urządzeń technicznych przez UDT wynika z art. 37 pkt 2, w związku z art. 13 ust. 1 oraz art. 14 ust. 2. Odrębną, wymienioną w ustawie o dozorze technicznym, kategorią są badania niszczące i nieniszczące wytwarzanych, naprawianych lub modernizowanych urządzeń technicznych oraz materiałów. Zgodnie z treścią art. 9 ust. 2 pkt 5 ustawy o dozorze technicznym:

„Art. 9 ust. 2. Organ właściwej jednostki dozoru technicznego, na wniosek wytwarzającego urządzenia techniczne oraz materiały i elementy stosowane do ich wytwarzania, naprawiającego lub modernizującego urządzenia techniczne, wydaje uprawnienie po stwierdzeniu, że wytwarzający, naprawiający lub modernizujący spełnia wymagania w zakresie wytwarzania, naprawy lub modernizacji tych urządzeń, a w szczególności: (...)



5) ma możliwość przeprowadzenia badań niszczących i nieniszczących wytwarzanych, naprawianych lub modernizowanych urządzeń technicznych oraz materiałów we własnym laboratorium lub **laboratorium uznanym przez organ właściwej jednostki dozoru technicznego**”.

Z analizy tego przepisu wynika, że wytwarzający, naprawiający lub modernizujący, aby uzyskać uprawnienie, powinien wykazać możliwość przeprowadzenia badań niszczących i nieniszczących wytwarzanych, naprawianych lub modernizowanych urządzeń technicznych oraz materiałów we własnym laboratorium lub laboratorium uznanym przez organ właściwej jednostki dozoru technicznego.

Wymóg wykonywania badań przez laboratorium uznane nie ma zastosowania, podobnie jak cały art. 9 ustawy, w procesie wytwarzania urządzeń technicznych zgodnie z dyrektywami europejskimi.

Z kontekstu, w jakim został sformułowany ten przepis, wynika, że:

- o uznanie ubiegać się mogą wyłącznie laboratoria, które wykażą fakt lub chęć współpracy z podmiotami wytwarzającymi, naprawiającymi lub modernizującymi, o których mowa w art. 9 ust. 1 ustawy,
- o wykonywanie badań urządzeń technicznych oraz materiałów na potrzeby wytwarzania, napraw lub modernizacji, wykonywanych przez przedsiębiorcę uprawnionego, ustawodawca zastrzegł do wyłącznych kompetencji laboratoriów własnych przedsiębiorcy lub laboratoriów uznanych przez organ właściwej jednostki dozoru technicznego.

Laboratoria uznane wykonują badania wynikające z uzgodnień z jednostką dozoru technicznego:

- uzgodnienie dokumentacji, zgodnie z którą zostanie wytworzone urządzenie techniczne,
- uzgodnienia w zakresie naprawy/modernizacji.

Badaniami na potrzeby wytwarzania, napraw i modernizacji są również:

- badania wykonywane w ramach kwalifikowania technologii,
- badania złączy egzaminacyjnych.

Laboratoria uznane wykonują również badania wynikające z potrzeb eksploatacyjnych, np. zastępcze i uzupełniające. Ustawa o dozorze technicznym nie odnosi się do nich w sposób bezpośredni. W tabelicy 1 podano przykłady zapisów warunków technicznych dozoru technicznego, odnoszące się do badań zastępczych i uzupełniających.

Tablica 1. Przykładowe zapisy warunków technicznych dozoru technicznego odnoszące się do badań zastępczych i uzupełniających

Akt wykonawczy do ustawy o dozorze technicznym	Przepis
Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 17 grudnia 2021 r. w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego dla niektórych urządzeń ciśnieniowych podlegających dozorowi technicznemu	<p>§ 22. 1. Rewizja wewnętrzna obejmuje ocenę wizualną stanu ścianek urządzenia ciśnieniowego, jego połączeń rozłącznych i nierozłącznych oraz osprzętu zabezpieczającego i osprzętu ciśnieniowego.</p> <p>2. W technicznie uzasadnionych przypadkach, po uzgodnieniu z organem właściwej jednostki dozoru technicznego, ocena wizualna, o której mowa w ust. 1, może być uzupełniona lub zastąpiona innymi badaniami.</p> <p>§ 25. Po uzgodnieniu z organem właściwej jednostki dozoru technicznego próbę hydrauliczną można zastąpić inną próbą lub badaniem innego rodzaju, umożliwiającym równoważną ocenę stanu technicznego urządzenia.</p>
Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 18 września 2001 r. w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego, jakim powinny odpowiadać zbiorniki bezciśnieniowe i niskociśnieniowe przeznaczone do magazynowania materiałów ciekłych zapalnych	<p>§ 58. 1. Rewizja wewnętrzna, o której mowa w § 57 ust. 1 pkt 1, polega na wizualnej ocenie stanu ścianek zbiornika, ich połączeń, wzmocnień oraz wyposażenia.</p> <p>2. Organ właściwej jednostki dozoru technicznego w uzasadnionych technicznie przypadkach może polecić uzupełnienie rewizji wewnętrznej lub zastąpić oględziny wewnętrzne innym badaniem, które pozwoli ocenić stan techniczny zbiornika.</p>
Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego, jakim powinny odpowiadać zbiorniki bezciśnieniowe i niskociśnieniowe przeznaczone do magazynowania materiałów trujących lub żrących	<p>§ 65. 1. Rewizja wewnętrzna, o której mowa w § 64 ust. 1 pkt 1, polega na ocenie wizualnej stanu ścianek wewnątrz zbiornika, ich połączeń, wzmocnień oraz wyposażenia.</p> <p>2. Organ właściwej jednostki dozoru technicznego w uzasadnionych technicznie przypadkach może polecić uzupełnienie rewizji wewnętrznej innym badaniem lub zastąpić ocenę wizualną innym badaniem, które pozwoli ocenić stan techniczny zbiornika.</p>

Badania zastępcze i uzupełniające wykonywane są zarówno przez CLDT, jak i laboratoria uznane. Wyniki tych badań wykorzystywane są następnie przez inspektorów UDT przy podejmowaniu decyzji w sprawie dalszej eksploatacji urządzenia. Dlatego też ważne jest podejmowanie kroków zapewnianych, że są one wykonywane w sposób rzetelny, zgodnie z zasadami zapisanymi w dokumentach normatywnych opisujących aktualny stan wiedzy w zakresie wykonywania tych badań.

W odniesieniu do badań wykonywanych przez laboratoria uznane podkreślić należy szczególne znaczenie badań nieniszczących. Gwałtowny postęp techniczny, z jakim mamy do czynienia w ostatnich latach, wpływa na sposób funkcjonowania gospodarki. Można zaobserwować, że wzrost produktywności uzależniony jest od rozwoju i możliwości adaptacji nowych technologii. Wdrażanie nowych technologii prowadzi w kierunku bardziej nowoczesnych sposobów produkcji, które stymulować mogą rozwój gospodarczy i zwiększenie konkurencyjności.

W odniesieniu do urządzeń (instalacji) technicznych, oprócz konieczności zapewnienia bezpieczeństwa, coraz częściej dostrzegana jest konieczność zapewnienia niezawodności oraz ciągłości ich funkcjonowania. Wzrost oczekiwań w tym aspekcie powoduje, że badania nieniszczące są coraz częściej wykorzystywane w fazie eksploatacji urządzeń technicznych.

Badania nieniszczące pozwalają na wykrycie nieciągłości materiałowych w badanym materiale, złączu spawanym, urządzeniu lub jego wyposażeniu, bez wywołania zmian ich właściwości użytkowych. Dzięki nim można monitorować cały cykl życia produktu i wykrywać wady oraz zapobiegać awariom. Jednocześnie gwarantują one zachowanie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa eksploatacji.

OCENA KOMPETENCJI LABORATORIÓW BADAWCZYCH

Ustawa o dozorze technicznym nie określa trybu i kryteriów uznawania laboratoriów. Niemniej organ właściwej jednostki dozoru technicznego, pomimo braku określenia w przepisach formy realizacji zadania, winien takie zadanie ustawowe realizować. Zaprzestanie uznawania laboratoriów mogłoby doprowadzić bowiem do sytuacji, w której podmioty wymienione w art. 9 ust. 2 nie miałyby możliwości spełnienia wymogów ustawowych koniecznych do uzyskania uprawnienia, ponieważ niewielu uprawnionych przedsiębiorców posiada własne laboratoria.

W roku 2019 podjęto w UDT decyzję o stworzeniu dokumentu odniesienia. WUDT-LAB Wydanie 3/2022 jest trzecią, obowiązującą obecnie, edycją tego opracowania. Określa ono wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych do wykonywania badań niszczących i nieniszczących urządzeń technicznych i materiałów oraz opisuje sposób postępowania w prowadzonych przez UDT procesach uznawania laboratoriów i nadzoru nad laboratoriami uznanymi.

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 ($n_{tot}(a)$):

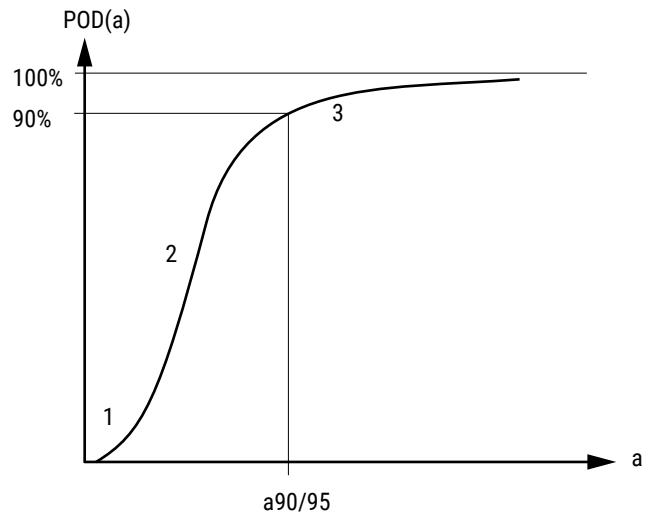
$$POD(a) = \frac{n_{pos}(a)}{n_{tot}(a)}$$

Możliwość uzyskania fałszywych wskazań – fałszywego alarmu PFI(A)

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

Oprócz POD istnieje druga możliwość opisanego 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.

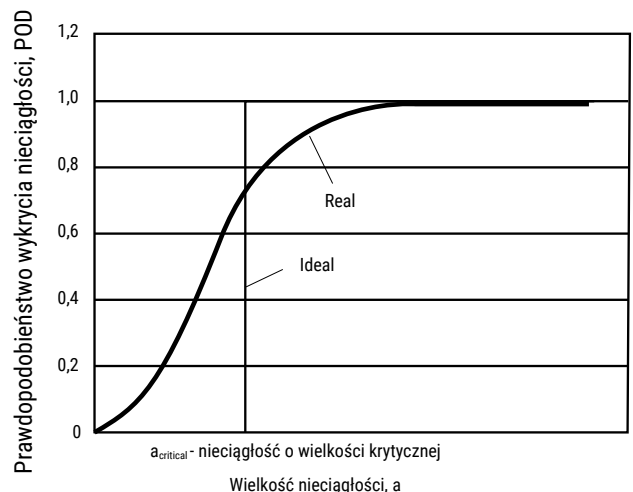
Krzywa POD pokazuje szacunkową zdolność wykrywania nieciągłości w zależności od jej rozmiaru dla danej metody/techniki badań.

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

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

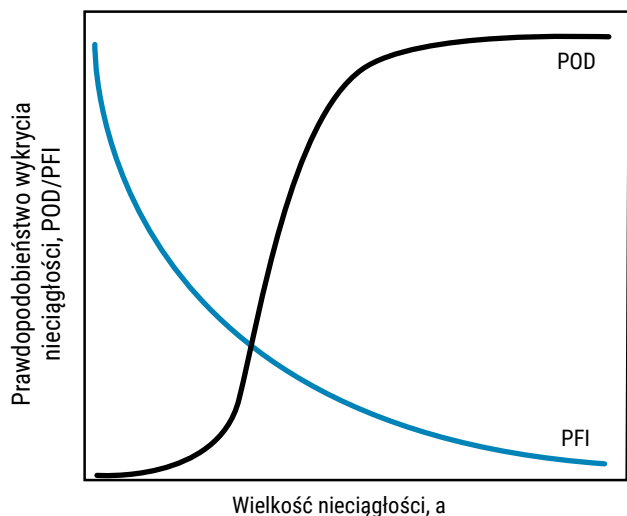
W idealnym przypadku moglibyśmy mieć wynik fałszywie dodatni (odrzucenie dopuszczalnych nieciągłości) lub fałszywie ujemny (zatwierdzenie nieciągłości niedopuszczalnych).

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



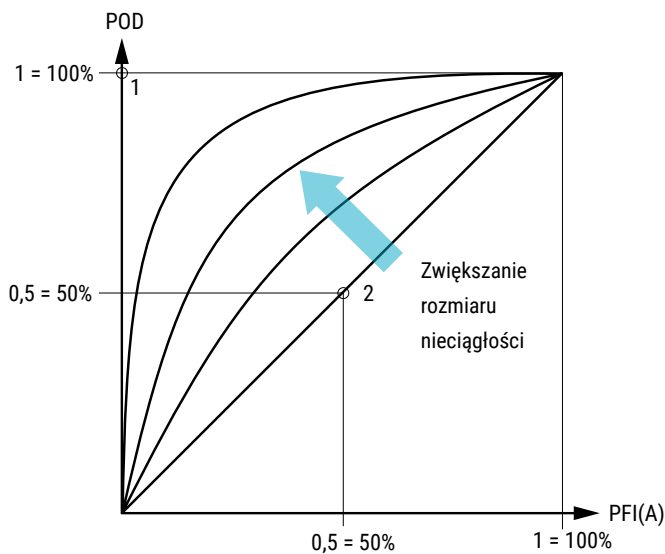
Rys. 2. Krzywa POD rzeczywista i idealna [2]

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]

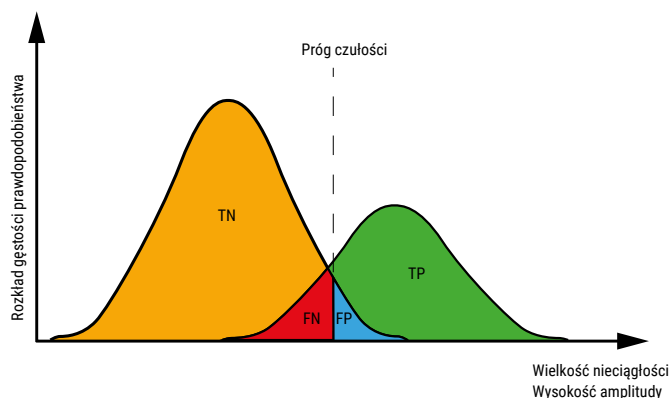
Wartości POD i PFI(A) naniesione na wykres dają w wyniku krzywą zwaną operacyjną charakterystyką wiarygodności ROC (Reliability Operating Characteristic).



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 PFI(A) 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 błędów 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 błędów 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.

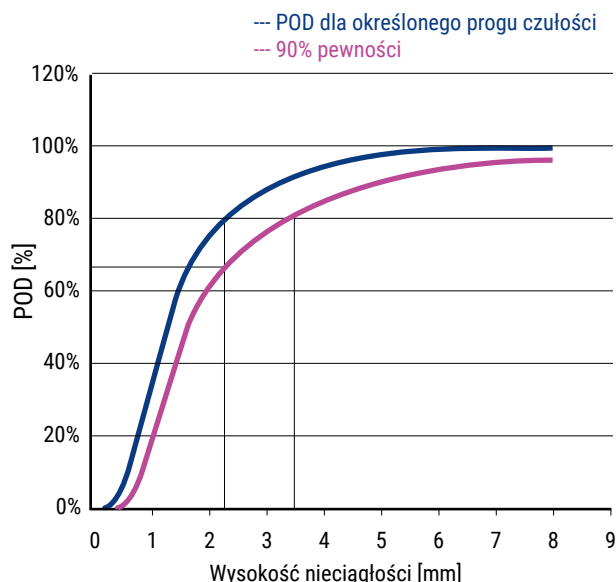
Im większy jest przedział ufności, tym:

- większe odchylenie standardowe,
- mniejszy poziom ufności.

JAK MOŻNA OPISAĆ POZIOM UFNOŚCI?

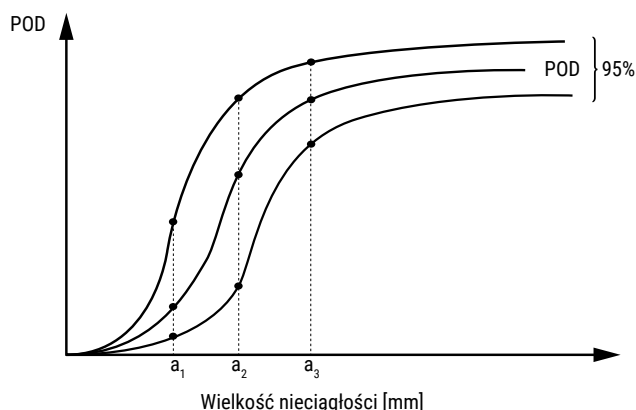
Dobrym sposobem opisanie krzywej ufności (np. 95%) jest poniższe stwierdzenie.

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)

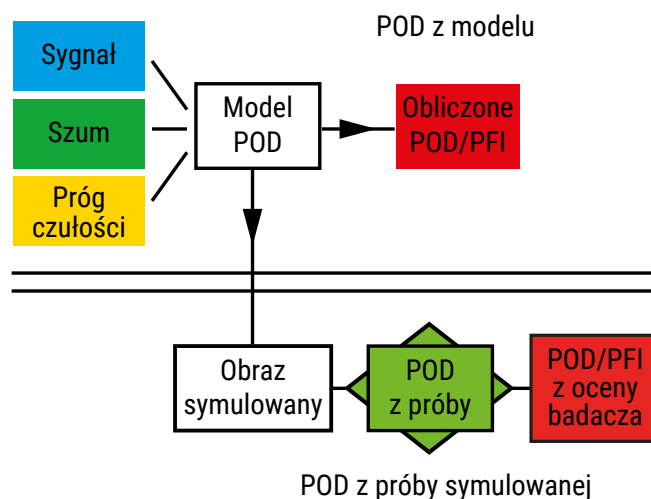
Reprezentują one metody analizy danych z badań obrazowych, takich jak radiogramy, w celu uzyskania informacji dotyczących POD i PFI.

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 pękania 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 pękania). 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 delowania.

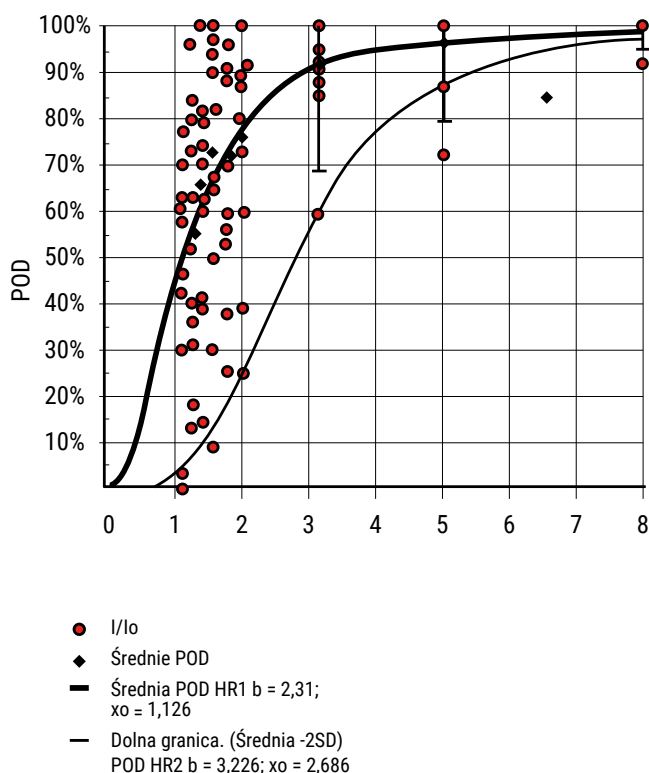
Powszechnie wiadomo, że czynnik ludzki jest bardzo ważny i zależy od wielu zmiennych, takich jak zmęczenie, środowisko, stres i złożoność zadania. Rozróżniamy zadania badawcze obejmujące „wzrok” i „koordynację wzrokowo-ruchową”.

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).

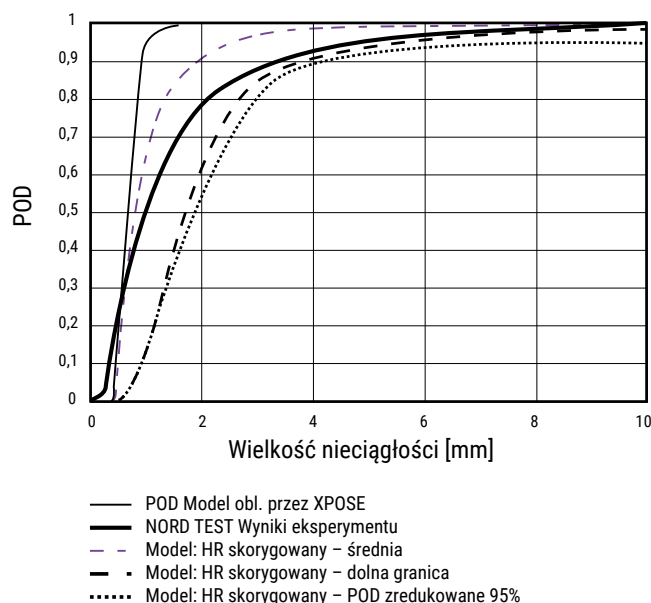
$$POD_{actual} = POD_{model} * H$$

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 błęd ludzkiego wyrażone jako POD na rys. 9, pochodzące z danych PISC III Programme [9]. Wykres pokazuje, że skutki błęd ludzkiego są większe w przypadku małych nieciągłości bliskich wartości progowej. **W tym przypadku błąd ludzki POD jest używany jako współczynnik H.** Wartości korekcji błęd ludzkiego zostały również wyrowadzone 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.



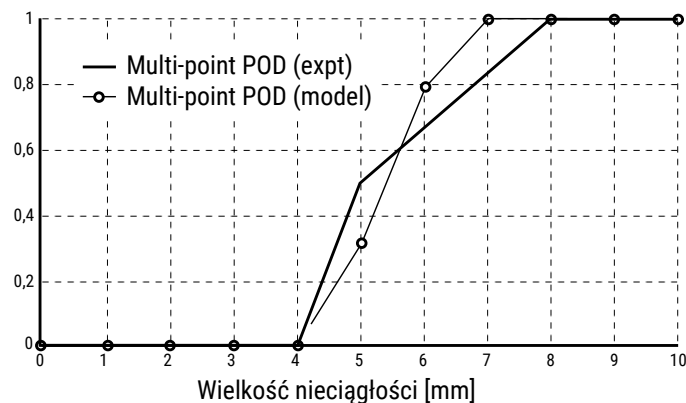
Rys. 10. Przykład pokazujący korekcję modelowej krzywej POD dla błęd ludzkiego (HR) i porównanie z eksperymentalnymi danymi NORDTEST POD (korekta przy użyciu średniej i dolnej granicy krzywych niezawodności człowieka przedstawionej na rysunku 9 – radiografia 25 mm blachy stalowej) [9]

WALIDACJA

WALIDACJA MODELI JEST WAŻNA DLA UZYSKANIA WIĘKSZEJ AKCEPTACJI DLA ICH WYKORZYSTANIA. MODELE POD SĄ OPARTE NA FIZYCZNYCH MODELACH DO KONTROLI 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”).



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 zbieżne 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.

WYAGANIA 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 ryzyka i szans.

Uwzględnienie zarówno ryzyka, 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:

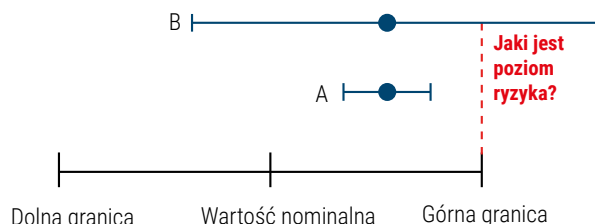
- do których wyników odnosi się stwierdzenie zgodności
- które specyfikacje, normy lub ich części są spełnione, a które nie
- zastosowaną zasadę podejmowania decyzji (o ile nie jest ona właściwie określona we wskazanej specyfikacji lub normie)”.

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.
<ul style="list-style-type: none"> ● 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	18. potrzeby w zakresie tłumaczeń	31. metody pracy	48. rozpraszanie (z powodu hałasu i innych czynników)
2. charakterystyka środowiska	19. potrzeby decyzji	32. zasady zarządzania	49. czas trwania fizjologicznego napięcia
3. temperatura	20. powtarzanie monotonia	33. wcześniejsze doświadczenie i przygotowania	50. zmęczenie
4. wilgotność	21. złożoność zadań	34. obecna praktyka w szkoleniu	51. dyskomfort i ból
5. jakość powietrza	22. potrzeba pamięci krótkotrwałej i długotrwałej	35. cechy osobiste	52. głód i pragnienie
6. oświetlenie	23. konieczność wykonania obliczeń	36. motywacja nastawienie	53. temperatura
7. odgłosy	24. informacja zwrotna z wyników	37. stan emocjonalny	54. promieniowanie
8. wibracje	25. komunikacja i struktura zespołu roboczego	38. postawy oparte na wpływach rodzinnych i innych czynnikach	55. ekstremalne przyspieszenia
9. stopień ogólnej czystości	26. czynniki interfejsu człowiek-maszyna	39. praca w grupie roboczej	56. trudność w wykonywaniu ruchów
10. godziny pracy czas pracy/odpoczynku	27. projekt zespół	40. nagle pojawienie się przyczyny psychologicznej	57. niedobór tlenu
11. dostępność do sprzętu przydatność	28. narzędzia	41. czas trwania napięcia psychicznego	58. ekstremalne ciśnienie atmosferyczne
12. organizacja zmian liczba inspektorów	29. wymagania dotyczące stosowania pisemnych procedur	42. natężenie pracy	59. brak wysiłku fizycznego
13. struktura instytucji uprawnienia obowiązki kanały komunikacji	30. komunikacja ustna i pisemna	43. obciążenie pracą	
14. działania przełożonych współpracowników		44. ryzyko w pracy	
15. nagrody podziękowania zachęty		45. strach przed porażką przegraną	
16. wymagania dla ruchów szybkość wytrzymałość precyzja		46. monotonia pracy	
17. warunki sterowania lub wyświetlania		47. długie okresy pracy bez zdarzeń	

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 WPLYWU 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:

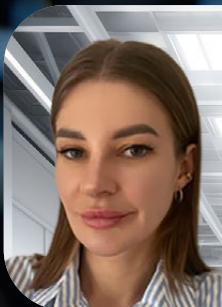
1. Welcome to the Wiki of the Chair of Non-destructive Testing, Probability of detection (POD), <https://collab.dvb.bayern/pages/viewpage.action?pageId=70096904> [dostęp: 09.2024]
2. M. Wall, F. A. Wedgwood, S. Burch. Modelling of NDT Reliability (POD) and applying corrections for human factors. AEA 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

BADANIE KOMPATYBILNOŚCI ZBIORNIKÓW WODORU Z TWORZYW SZTUCZNYCH DO MAGAZYNOWANIA STACJONARNEGO WEDŁUG NORM PN-EN 17533 i PN-EN ISO 11114-2



MGR INŻ. LESZEK LEWANDOWSKI

Ekspert niezależny ds. Tworzyw Sztucznych
Pracownik Urzędu Dozoru Technicznego
w latach 1984–2023 (Oddział w Bydgoszczy)



MGR INŻ. PAULA GĄCIARZ

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



Obecnie światowym standardem staje się wymaganie, aby magazynowana substancja chemiczna nie oddziaływała negatywnie na zbiorniki. Również istotne jest, aby zbiorniki nie oddziaływały negatywnie na magazynowaną substancję chemiczną.

Do największych zalet tworzyw sztucznych, w porównaniu do materiałów metalicznych, należą wysoka odporność chemiczna, kompatybilność chemiczna i niewystępowanie destrukcyjnego zjawiska korozji. Muszą one współpracować nie tylko z wieloma magazynowanymi niebezpiecznymi substancjami chemicznymi, ale także z innymi materiałami stosowanymi do budowy zbiorników, na przykład w skomplikowanych układach kompozytowych (tworzywo i metal, szkło, grafit itd.).

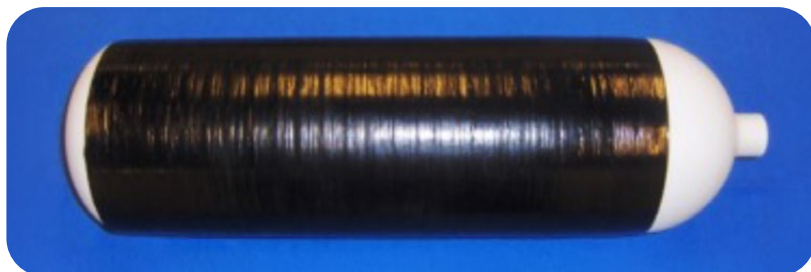
Badania kompatybilności pozwalają określić, czy nie występują niepożądane interakcje pomiędzy materiałem zbiornika i magazynowaną substancją chemiczną.

W artykule opisano badania i potwierdzanie kompatybilności dla zbiorników wodoru z tworzyw sztucznych do magazynowania stacjonarnego, projektowanych i wytwarzanych zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 17533.

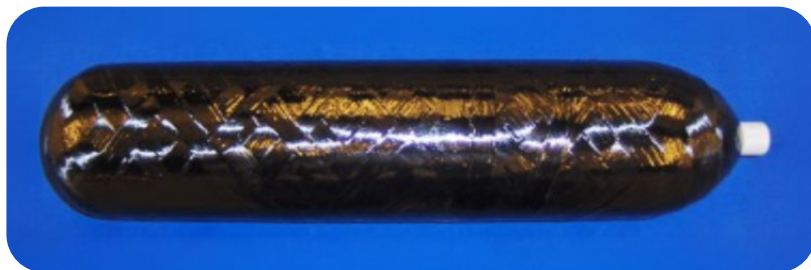
Norma EN 17533 została opracowana przez Komitet Techniczny CEN/TC 23 „Transportable gas cylinders” i wdrożona w Polsce jako PN-EN 17533:2020-11 „Gazowy wodór. Butle i zbiorniki rurowe do magazynowania stacjonarnego” [1]. W **Polskim Komitecie Normalizacyjnym** odpowiedzialnym za normę jest KT 130 do spraw Aparatury Chemicznej, Zbiorników i Butli do Gazów.

WYMAGANIA NORMATYWNE

Norma [1] określa wymagania dotyczące projektowania, wytwarzania i badań pojedynczych lub połączonych kolektorem butli do gazów, zbiorników rurowych i innych zbiorników ciśnieniowych ze stali, stopów aluminium lub niemetalowych materiałów konstrukcyjnych przeznaczonych do magazynowania stacjonarnego gazowego wodoru mających konstrukcję metalową bez szwu (typ 1) lub konstrukcję kompozytową (typy 2, 3 i 4). W przypadku zbiorników kompozytowych typu 2 i 3 norma dopuszcza stosowanie wykładzin metalowych, ale bez złączy spawanych.



ZBIORNIK TYPU 2
Zbiornik z wzmacniającym konstrukcyjnie oplotem obwodowym kompozytowym tylko na części cylindrycznej [13]



ZBIORNIK TYPU 3
Zbiornik z wzmacniającym konstrukcyjnie pełnym oplotem krzyżowym kompozytu wraz z dennicami [13]



ZBIORNIK TYPU 4
Zbiornik całkowicie wykonany z tworzyw sztucznych (laminat i wykładzina z tworzywa termoplastycznego) z oplotem krzyżowym kompozytowym [14]

Rys. 1. Przykłady zbiorników z tworzyw sztucznych do magazynowania wodoru typu 2, 3 i 4

Tabela 1. Typy zbiorników ([1] pkt 3.1.33, 3.1.34, 3.1.35, 3.1.36)

Typ 1	Zbiorniki metalowe bez szwu
Typ 2	Zbiorniki z oplotem obwodowym i wykładziną metalową, wzmocnione włóknem tylko na części cylindrycznej
Typ 3	Zbiorniki z pełnym oplotem i wykładziną metalową przenoszącą obciążenia, wzmocnione włóknem na części cylindrycznej i dennicach
Typ 4	Zbiorniki z pełnym oplotem i wykładziną nieprzenoszącą obciążenia, wzmocnione włóknem na części cylindrycznej i dennicach

Wymagania normy [1] nie dotyczą zbiorników ciśnieniowych stosowanych do magazynowania wodoru:

**w stanie stałym,
w stanie ciekłym,
pod wysokim ciśnieniem w warunkach kriogenicznych.**

Norma [1] określa maksymalne parametry zbiorników:

- maksymalną pojemność wodną zbiornika w wysokości 10 000 l,
- maksymalną wartość iloczynu ciśnienia i pojemności w wysokości 300 000 MPa × l,
- zakres maksymalnego dopuszczalnego ciśnienia roboczego, które nie powinno być mniejsze niż 15 MPa i nie może przekraczać 110 MPa.

W dalszej części opracowania prezentujemy wymagania i badania wyłącznie dla zbiorników z tworzyw sztucznych, tj. zbiorników typu 4.

WYMAGANIA I BADANIA MATERIAŁOWE

Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 17533, pkt 7 własności materiałów stosowanych do budowy zbiorników powinny być potwierdzone badaniami obejmującymi:

- kompatybilność,
- wzmocnienia,
- żywice,
- wykładziny z tworzyw termoplastycznych.

Wymagania dla badań materiałów zbiorników typu 2, 3 i 4 określone są w punkcie 8.3.2 normy.

Tabela 2. Wymagania dla badań materiałów zbiorników typu 2, 3 i 4 ([1] pkt 8.3.2)

BADANIE	NORMY BADAWCZE	LICZBA PRÓBEK	PUNKT NORMY	TYP 2	TYP 3	TYP 4
Badanie materiałowe wykładzin z tworzyw termoplastycznych	EN ISO 11114-2 EN ISO 527-2 EN ISO 306	1 wykładzina	8.3.2.6 A.3 A.4			X
Własności żywic	EN ISO 14130 EN ISO 11357-2	Próbka kompozytu	8.3.2.7 A.5	X	X	X
Badanie powłok ochronnych	EN ISO 4624, EN ISO 1519 EN ISO 6272-2, EN ISO 2812-1 EN ISO 16474-1, EN ISO 16474-3 EN ISO 9227, ASTM D3170-14	Próbka powłoki ochronnej	8.3.2.8 A.19	X	X	X

MATERIAŁY

Zgodnie z normą [1] do budowy zbiorników stosowane są następujące materiały.

Tabela 3. Materiały do budowy zbiorników ([1] pkt 7.5, 7.6, 7.7)

Żyvice	Termoutwardzalne <ul style="list-style-type: none"> ● epoksydowa ● poliestrowa ● winyloestrowa
Żyvice	Termoplastyczne <ul style="list-style-type: none"> ● polietylenowa ● poliamidowa
Wzmocnienia	<ul style="list-style-type: none"> ● węglowe ● aramidowe ● szklane ● kombinacje wymienionych powyżej

KOMPATYBILNOŚĆ

Norma PN-EN 17533 wymaga dla zbiorników wodoru z tworzyw sztucznych badań kompatybilności według normy PN-EN ISO 11114-2 [2].

Norma ISO 11114-2 została opracowana przez Komitet Techniczny: ISO/TC 58 „Gas cylinders” i wdrożona w Polsce jako PN-EN ISO 11114-2:2022-04 Butle do gazów – Zgodność materiałów butli i zaworu z zawartym w butli gazem – Część 2: Materiały niemetalowe. W Polskim Komitecie Normalizacyjnym odpowiedzialnym za normę jest KT 130 do spraw Aparatury Chemicznej, Zbiorników i Butli do Gazów.

Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 17533, pkt 7.1 zaleca się także korzystanie z wytycznych do badań kompatybilności zawartych w publikacjach wyszczególnionych w bibliografii normy [1] pod pozycjami 10, 12, 14, 21 i 25. Publikacje te wymienione są w wykazie literatury do niniejszego artykułu [3–7].

Na kompatybilność gazów z materiałami niemetalowymi wpływają reakcje chemiczne i oddziaływania fizyczne, które zostały sklasyfikowane następująco.

RYZIKO BRAKU KOMPATYBILNOŚCI

GWAŁTOWNA REAKCJA UTLENIANIA/SPALANIA (F)

Większość istotnych awarii związanych z szybkim utlenianiem lub gwałtownym spalaniem jest spowodowana przez gaz utleniający pod wysokim ciśnieniem. Z tego powodu zaleca się przeprowadzenie szczegółowych badań wszystkich materiałów i czynników, z uwzględnieniem wszystkich dostępnych danych, przed zaprojektowaniem lub użyciem sprzętu przeznaczonego do pracy z gazami utleniającymi.

Kompatybilność jest w dużej mierze uzależniona od warunków pracy, takich jak ciśnienie, temperatura, prędkość przepływu gazu, obecność cząstek, konstrukcja sprzętu i jego zastosowanie. Szczególną uwagę należy zwrócić na ryzyko związane z gazami, takimi jak: tlen, fluor, chlor i trifluorek azotu. Większość materiałów niemetalicznych może stosunkowo łatwo zapalić się w kontakcie z gazami utleniającymi, a nawet w kontakcie z gazami, które nie są sklasyfikowane jako utleniające, ale nadal podtrzymują spalanie.

- Dobór materiałów do stosowania z tlenem lub w atmosferze wzbogaconej w tlen polega głównie na zrozumieniu warunków, które mogą spowodować reakcję materiału z tlenem.
- Większość materiałów nie zapali się w kontakcie z tlenem bez źródła zapłonu o wystarczającej energii (np. tarcie, ciepło sprężania, uderzenia cząstek itp.).
- Jeśli szybkość dostarczania energii zamienianej na ciepło jest większa niż szybkość odprowadzania energii i wynikający stąd przyrost ciepła trwa wystarczająco długo, może nastąpić zapłon i palenie.

Należy zatem uwzględnić dwa główne czynniki:

1. właściwości kompatybilności materiałów (łatwość zapłonu i energia spalania),
2. różne źródła energii, które mogą spowodować wystarczający wzrost temperatury materiału.

Zaleca się, aby te kluczowe czynniki były brane pod uwagę przez cały proces projektowania i aby specyficzne czynniki wymienione poniżej miały odpowiednie znaczenie.

Specyficzne czynniki, które należy uwzględnić, to:

- właściwości materiałów, w tym czynniki wpływające na łatwość zapłonu i warunki mogące prowadzić do potencjalnych uszkodzeń (ciepło reakcji),

- warunki eksploatacji, takie jak ciśnienie, temperatura, stężenie tlenu i/ lub gazu utleniającego, wpływ rozcieńczalnika (np. helu), zanieczyszczenie powierzchni,
- potencjalne źródła zapłonu, takie jak tarcie, ciepło sprężania, ciepło zderzeń mas, ciepło zderzeń cząstek, elektryczność statyczna, łuk elektryczny, rezonans, wewnętrzna sprężystość,
- możliwe konsekwencje, na przykład oddziaływanie na otoczenie, takie jak przenoszenie ognia,
- dodatkowe czynniki, w tym spełnienie wymagań, wcześniejsze doświadczenia, dostępność i koszty.

Ze względu na powyższe czynniki ocena kompatybilności materiałów niemetalicznych jest bardziej krytyczna niż ocena materiałów metalicznych, które zazwyczaj zachowują się dobrze w kontakcie z tlenem.

WYMAGANIA DOTYCZĄCE GAZÓW UTLENIAJĄCYCH

Nie można jednoznacznie określić kompatybilności materiałów niemetalicznych z gazami utleniającymi, takimi jak tlen, chlor, tlenek azotu, podtlenek azotu, dwutlenek azotu, trifluorek azotu itp. W przypadku fluoru, który jest najbardziej utleniającym gazem, wszystkie materiały niemetaliczne były historycznie uznawane za „nie dopuszczalne”.

W przypadku mieszanin fluoru przemysł gazowy obecnie posiada dowody na pomyślne testy i historię bezpiecznego stosowania PTFE i PCTFE w kontrolowanych warunkach (np. przy niskim stężeniu i niskim ciśnieniu). Dlatego też, po ocenie i zatwierdzeniu przez kompetentną osobę, materiały te mogą być używane w podobnych warunkach.

Tlen i inne gazy utleniające mogą gwałtownie reagować z wszystkimi materiałami niemetalicznymi, takimi jak:

- tworzywa sztuczne: PTFE, PCTFE, PVDF, PA, PP, PE, PET, PEEK, PPS, PVC, PI, POM,
- elastomery (gumy): IIR, NBR, CR, FKM, VMQ, EPDM, ACM, PUR, ECO, FVMQ;
- smary płynne: HC, FC.

Niektóre materiały, takie jak PTFE i FKM, są bardziej odporne na zapłon niż inne tworzywa sztuczne i elastomery. Smary HC zazwyczaj są niedopuszczalne. W pewnych warunkach inne wymienione tworzywa sztuczne i elastomery mogą być bezpiecznie stosowane w procesie utleniania, nie wykazując przy tym wad:

- PTFE, takich jak słabe właściwości mechaniczne i ryzyko uwalniania toksycznych produktów w zastosowaniach związanych z gazami do oddychania (patrz ISO 15001 [8]),
- lub
- FKM, takich jak pęcznienie, słabe właściwości mechaniczne w niskiej temperaturze i ryzyko uwalniania toksycznych produktów w zastosowaniach z gazami do oddychania.

W związku z tym materiały niemetalowe mogą być stosowane tylko wtedy, gdy badania (lub długie i bezpieczne doświadczenie eksploatacyjne) wykazują, uwzględniając wszystkie warunki pracy, a zwłaszcza konstrukcję sprzętu, że ich użycie jest bezpieczne. W normach ISO 11114-3 [2] i ISO 21010 [9] podano metody badań materiałów polimerowych i płynnych smarów. Niektóre materiały niemetalowe mogą być bezpiecznie stosowane pod wyższym ciśnieniem, jeśli zostaną pomyślnie przetestowane w ostatecznej konfiguracji projektowej, np. w zaworach butli gazowych i reduktorach. Zawory butli przeznaczone do stosowania z gazem utleniającym powinny być badane zgodnie z normą ISO 10297 [10].

UTRATA MASY (W)

Kolejnym ryzykiem braku kompatybilności jest utrata masy.

- **Ekstrakcja** plastifikatorów z elastomerów za pomocą rozpuszczalników może prowadzić do ich kurczenia się (ubywania), zwłaszcza w przypadku produktów o wysokiej zawartości plastifikatorów.

Niektóre rozpuszczalniki, takie jak aceton czy DMF, używane do rozpuszczania gazów, np. acetyleny, mogą uszkadzać materiały niemetaliczne. Skroplone gazy mogą działać jak rozpuszczalniki.

Istnieje również zjawisko **oddziaływania chemicznego**. Gazy mogą chemicznie oddziaływać na niektóre materiały niemetaliczne. Takie działanie może czasem prowadzić do całkowitego zniszczenia materiału, na przykład chemiczne oddziaływanie amoniaku na elastomery silikonowe.

PĘCZNIE NIE MATERIAŁU (S)

- Może również nastąpić **pęcznienie** materiału. Tworzywa sztuczne i elastomery mogą pęcznieć w wyniku absorpcji gazów (lub cieczy). To może spowodować niepożądane zwiększenie wymiarów (szczególnie pierścieni uszczelniających) lub pękanie z powodu nagłego uwolnienia gazu podczas zmniejszenia ciśnienia, na przykład dwutlenku węgla lub chlorofluorowęglowodorów.

Początkowe pęcznienie można zamaskować poprzez późniejszą ekstrakcję plastifikatorów i wypełniaczy. Należy również brać pod uwagę inne istotne efekty, takie jak zmiany w wytrzymałości mechanicznej i twardości.

Różnice w składzie i formie użytkowej elastomerów mogą prowadzić do znaczących różnic w pęcznieniu materiału.

Niezależnie od powyższej oceny kompatybilności, przed podjęciem decyzji o zastosowaniu elastomerów lub tworzyw sztucznych należy wziąć pod uwagę konfigurację konstrukcyjną (np. uszczelnienie statyczne lub dynamiczne).

Norma ISO 11114-2 [2] określa, że pęcznienie powyżej 15% w normalnych warunkach użytkowania jest oznaczone symbolem NR (niezależne); pęcznienie poniżej tego poziomu oznacza się symbolem A (akceptowalne), jeśli inne ryzyka są akceptowalne. Należy nadmienić, iż istnieje również ryzyko tworzenia się wiązań krzyżowych pomiędzy kauczukiem wulkanizowanym siarką a stopami miedzi.

ZMIANY WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH (M)

Do ryzyka braku kompatybilności możemy również zaliczyć zmiany właściwości mechanicznych. Gazy mogą spowodować niepożądaną zmianę właściwości mechanicznych niektórych materiałów niemetalicznych. Może to prowadzić na przykład do wzrostu twardości lub spadku elastyczności (czyli zwiększenia odkształcenia po ścisnieniu). Norma ISO 1817 [11] określa metody badań, które sprawdzają wpływ gazu na właściwości mechaniczne.



MOŻNA PRZYWOŁAĆ RÓWNIEŻ INNE KWESTIE DOTYCZĄCE KOMPATYBILNOŚCI.

● Zanieczyszczenia w gazie (I)

Niektóre gazy zawierają typowe zanieczyszczenia, które być może nie będą kompatybilne z przeznaczonymi materiałami (np. aceton w acetylenie, siarkowodór w metanie).

● Zanieczyszczenia materiału (C)

Używanie toksycznego gazu może spowodować zanieczyszczenie niektórych materiałów, co powoduje, że stają się one same w sobie niebezpieczne (np. podczas konserwacji sprzętu).

● Uwalnianie niebezpiecznych produktów (D)

W warunkach ekstremalnych wiele materiałów może uwalniać niebezpieczne produkty (np. substancje toksyczne), co należy uwzględnić szczególnie w przypadku gazów oddechowych określonych w normie ISO 15001 [8].

● Starzenie (G)

Starzenie jest to stopniowa zmiana właściwości mechanicznych i fizycznych materiału pod wpływem otoczenia, w którym jest używany lub przechowywany (np. ekspozycja na promieniowanie UV). Elastomery i tworzywa sztuczne są szczególnie narażone na starzenie. Niektóre gazy, jak tlen, oraz wysokie temperatury mogą przyspieszyć ten proces, prowadząc do degradacji, np. poprzez pęknięcie czy kruchość.

● Przenikanie (P)

Przenikanie to proces, podczas którego gaz przenika przez materiał. Przenikanie niektórych gazów (np. helu, wodoru, dwutlenku węgla) przez materiały niemetaliczne może być znaczne. Szybkość przenikania zależy głównie od temperatury, ciśnienia, grubości i powierzchni kontaktu materiału z gazem. Masa cząsteczkowa oraz specyficzna forma użytkowania plastifikatorów i innych dodatków może powodować różnice w szybkości przenikania dla konkretnego typu tworzywa sztucznego lub elastomeru.

To ostatnie zagrożenie powinno być brane pod uwagę ze względu na skutki dla środowiska (np. toksyczność, potencjalne pożary).

Przenikanie przez wykładzinę może prowadzić do powstania ciśnienia gazu pomiędzy wykładziną a kompozytem, co może spowodować zapadnięcie lub oderwanie się wykładziny i/lub powstawanie pęcherzy.

W normie ISO 11114-2 [2] została przedstawiona tabela kompatybilności dla popularnie używanych gazów. Na potrzeby artykułu zostanie przywołany tylko wodór. Jeżeli kombinacja gaz/materiał jest niedopuszczalna, podaje się główny powód, stosując odpowiedni skrót określający ryzyko niezgodności (patrz skróty zaznaczone kolorem czerwonym w tekście artykułu). Skrócone terminy są również czasami używane w odniesieniu do akceptowalnych kombinacji, aby wykazać ograniczone ryzyko.

Jeżeli w tabeli 4 nie podano numeru UN dla gazu (lub cieczy), oznacza to, że gaz ten nie ma oficjalnego numeru UN, ale może być magazynowany i transportowany przy użyciu ogólnego numeru NOS (nieokreślonego inaczej) (np. gaz sprężony, łatwopalny, NOS, ONZ 1954).

Ocena kompatybilności opiera się na następujących dokumentach:

- dane literaturowe,
- doświadczenia operacyjne,
- testy laboratoryjne.

Odporność materiału na gazy można oszacować za pomocą prostych testów zanurzeniowych w odpowiednim gazie przy mniej więcej takich samych lub zwiększonych warunkach ekspozycji (wzrost temperatury, ciśnienia lub natężenia przepływu). W wielu przypadkach wymagane są czasochłonne i wymagające sprzętu metody badawcze do oceny przenikania i absorpcji, a także odporności na pęknięcie naprężeniowe.

Oprócz wizualnej oceny wykrywalnych zmian, parametrami badań zanurzeniowych są zmiany masy i wymiarów oraz przebieg parametrów mechanicznych i innych właściwości fizycznych w zależności od czasu zanurzenia. Są one konsultowane jako cechy klasyfikacyjne.

W celu sprawdzenia odporności materiału można zastosować procedury badawcze opisane w normach ISO 1817 [11] i ISO 9539 [12].

Zastosowano następujące skróty:

A – akceptowalne,

N – niedopuszczalne do stosowania w normalnych warunkach pracy,

n – nie można wydać wiarygodnych zaleceń ze względu na brak dostatecznych informacji,

u – kompatybilność uzależniona jest od warunków stosowania (np. tlen), a materiał może być stosowany, jeżeli został oceniony i autoryzowany przez kompetentną osobę, która określi warunki stosowania.

Poniższe dwa przykłady ułatwią analizę tabeli nr 4 i 5.

PRZYKŁAD 1

AP

Symbol kompatybilności = A – akceptowalny

Symbol potencjalnego ryzyka kompatybilności = P – przenikanie

Ten przykład pokazuje akceptowalną kombinację materiał/gaz, odpowiednią do stosowania w normalnych warunkach pracy pod warunkiem, że ryzyko przenikania zostało ocenione i uznane za akceptowalne.

PRZYKŁAD 2

NF, C

Symbol kompatybilności = N – niedopuszczalne do stosowania w normalnych warunkach pracy

Symbol ryzyka niezgodności:

pierwsze ryzyko = F – gwałtowna reakcja utleniania/spalania

drugie ryzyko = C – zanieczyszczenia materiału

Ten przykład pokazuje kombinację materiał/gaz, niedopuszczalną do ogólnego użytku, z ryzykiem niezgodności w postaci gwałtownej reakcji (pierwsze ryzyko) i zanieczyszczenia materiału (drugie ryzyko).

Tabela 4. Kompatybilność materiałów niemetalicznych z gazami, gdy są używane inaczej niż z wykładziną [2]

Nr	Numer UN	Nazwa gazu	Wzór	R#	TWORZYWO SZTUCZNE										
					PTFE	PI	PCTFE	PVDF	PA ^(a)	PP	POM	PEEK	PPS	PVC	
57	1049	WODÓR	H ₂	ND	AP	A	A	A	A	A	AP	A	A	A	A

cd. tabeli 4

ELASTOMERY										SMARY		MoS ₂
IIR	NBR	CR	FKM	VMQ	EPDM	FVMQ	ACM	PUR	ECO ^(b)	HC	FC	
A	A	A	A	AP	A	AP	AP	A	A	A	A	A

LEGENDA (tabela 4)

- (a) - Informacje dotyczące kompatybilności PA podane w tej tabeli opierają się głównie na PA 6.6 i niekoniecznie obejmują wszystkie inne typy PA.**
(b) - Materiał ten jest używany wyłącznie do gazów chłodniczych o niskim ciśnieniu.

Tabela 5. Kompatybilność materiałów niemetalicznych z gazami, gdy są używane jako materiał wykładziny [2]

Nr	Numer UN	Nazwa gazu	Wzór	Kluczowe cechy kompatybilności (a)(b)	Wykładziny	
					Akceptowalne	Nieakceptowalne
57	UN 1049	WODÓR	H ₂	Główne ryzyko stanowi przenikanie i uszkodzenie wykładziny, zatem możliwe jest, że projekt będzie musiał zostać dostosowany, w zależności od wymagań użytkownika.	PA, PE, PET	-

LEGENDA (tabela 5)

- (a) W przypadku stosowania wykładzin z tworzywa sztucznego konieczne jest użycie metalowych tulei króćców. Informacje na temat kompatybilności tulei metalowych można znaleźć w normie ISO 11114-1.**
(b) Jeżeli zbiorniki są wyposażone w wykładzinę z tworzywa sztucznego, patrz ISO 11114-5.

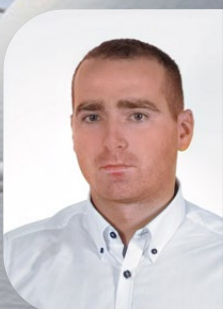
WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

- Publikacja nie dotyczy zbiorników transportowych.
- Badanie kompatybilności jest tylko jednym z wymogów normy [1]. Wytwórcy zbiorników powinni spełnić wszystkie pozostałe wymagania, a w szczególności przeprowadzić następujące badania zbiorników:
 - testy ciśnieniowe na rozerwanie i przyspieszone badania do pęknięcia,
 - cykliczne testy ciśnieniowe w temperaturze otoczenia i temperaturach ekstremalnych,
 - cykliczne testy zbiorników napełnionych wodorem,
 - testy na przenikalność i badanie wycieku przed pęknięciem,
 - próby ogniowe i zrzutowe oraz testy na przestrzelenie,
 - badanie wytrzymałości na skręcanie.
- Opisana w publikacji metodyka badań i potwierdzania kompatybilności dla zbiorników wodoru jest aktualnie w Polsce wdrażana przez Urząd Dozoru Technicznego i Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego, które oferuje przeprowadzenie następujących badań:
 - badanie materiałowe wykładzin z tworzyw termoplastycznych,
 - badanie własności żywic,
 - badanie powłok ochronnych,
 - określenie zmian właściwości mechanicznych,
 - określenie oddziaływania chemicznego,
 - badanie pęcznienia.

Literatura:

- PN-EN 17533:2020-11 Gazowy wodór. Butle i zbiorniki rurowe do magazynowania stacjonarnego
- PN-EN ISO 11114-2:2022-04 Butle do gazów -- Zgodność materiałów butli i zaworu z zawartym w butli gazem -- Część 2: Materiały niemetalowe
- ANSI/AIAA G-095-2004 Guide to Hydrogen and Hydrogen Systems
- ANSI/CSA CHMC 1-2014 Test methods for evaluating material compatibility in compressed hydrogen applications - Metals
- ASME STP-PT-014 „Data Supporting Composite Tank Standards Development for Hydrogen Infrastructure Applications”
- SANDIA NATIONAL LABORATORIES. Technical Reference for Hydrogen Compatibility of Materials
- HERVE BARTHELEMY, J. BRYSELBOUT, C. BARBE Hydrogen assisted of materials - a newly developed test and its application to hydrogen transport vessels – American Society of Metals
- ISO 15001:2010 Anaesthetic and respiratory equipment – Compatibility with oxygen
- ISO 21010:2017 Cryogenic vessels – Gas/material compatibility
- ISO 10297:2024 Gas cylinders – Cylinder valves – Specification and type testing
- ISO 1817:2024 Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of the effect of liquids
- ISO 9539:2010 Gas welding equipment – Materials for equipment used in gas welding, cutting and allied processes
- Barthelemy H., Angoletti A., Cylinders and Tubes used as Buffers in the Filling Stations ICHS, Yokohama (Japan), October 21st, 2015
- Hydrogen high-pressure Type 4 cylinders, www.hexagonpurus.com, <https://hexagonpurus.com/our-solutions/hydrogen-type-4-cylinders> [dostęp: 09.2024]

WYSOKOTEMPERATUROWY ATAK WODOROWY PROCEDURA WYKRYWANIA HTHA



MGR INŻ. RADOSŁAW HOŁOWNIA

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



CLDT

Aparaty przemysłu rafineryjno-petrochemicznego, które pracują w środowiskach zawierających wodór, mogą ulegać w wysokich temperaturach degradacji związanej z wystąpieniem wysokotemperaturowego ataku wodorowego (HTHA – ang. High Temperature Hydrogen Attack). Oddziaływanie wodoru na stale w wysokiej temperaturze może powodować znaczne osłabienie konstrukcji, co z kolei stwarza niebezpieczeństwo wystąpienia poważnej w skutkach awarii.

Analizy mechanizmów degradacji prowadzone w ramach ocen RBI (ang. Risk Based Inspection) wskazują na konieczność wykonywania badań takich urządzeń, ukierunkowanych pod kątem detekcji uszkodzeń wywołanych HTHA. Na wystąpienie wysokotemperaturowego ataku wodorowego narażone są przede wszystkim urządzenia pracujące w instalacjach reformingu katalitycznego, hydrorafinacji, izomeryzacji, wytwarzania amoniaku i reformingu parowego.

Możliwość wykrycia HTHA znajdującego się na wczesnym etapie rozwoju daje zastosowanie odpowiednich technik badań ultradźwiękowych, takich jak Phased Array (PA), Time of Flight Diffraction (TOFD), Total Focusing Method (TFM) / Full Matrix Capture (FMC). Istotne jest również użycie odpowiednich głowic ultradźwiękowych i dobór układów skanowania. Dla przeprowadzenia badania niezwykle ważne jest także posiadanie odpowiednich próbek odniesienia ze sztucznymi reflektorami, np. otworkami płaskodennymi (FBH – ang. Flat Bottom Hole), nacięciami (ang. notch) oraz próbek zawierających uszkodzenia wywołane wysokotemperaturowym atakiem wodorowym. Ocena wyników polega na odpowiedniej klasyfikacji otrzymanych wskaźników ultradźwiękowych oraz określeniu ich wielkości i stopnia nasilenia względem przyjętych kryteriów akceptacji, które należy zawrzeć w procedurze badania [1].

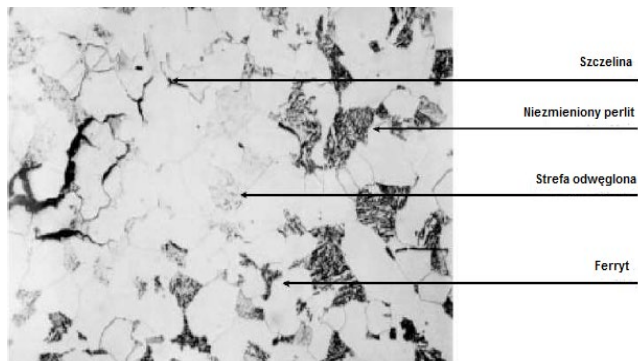
OPIS MECHANIZMU DEGRADACJI

Na czym polega wysokotemperaturowy atak wodorowy (HTHA)?

W wysokich temperaturach dochodzi do dysocjacji i absorpcji wodoru w stali. Dyfundujący wodór atomowy wchodzi w reakcję z węglikiem żelaza, prowadząc do powstania metanu i lokalnych odwęglu. Zachodzące przemiany można opisać poniższym równaniem (1).



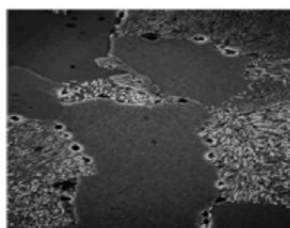
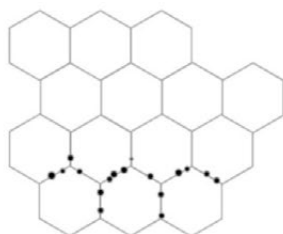
Cząsteczki metanu z uwagi na swoje rozmiary nie mogą swobodnie dyfundować przez stal. Dochodzi więc do nagromadzenia cząsteczek tego gazu na granicach ziaren. Lokalny wzrost ciśnienia prowadzi z kolei do powstania mikropęknięć. Wytworzone w ten sposób uszkodzenia skutkują utratą ciągliwości i wytrzymałości danego materiału. Przykładowe uszkodzenia wywołane HTHA oraz proces powstawania tego mechanizmu degradacji przedstawiono kolejno na rysunkach 1 i 2.



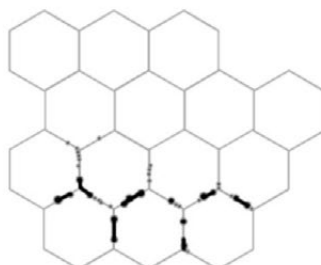
Rys. 1. Stal C-0,5Mo (ASTM A204 klasa A) wykazująca wewnętrzne odwęglenie i pękanie w procesie wysokotemperaturowego wodoru [4] (API 941)

1 ETAP	2 ETAP	3 ETAP
Wodór reaguje z węglkami umiejscowionymi w materiale, co prowadzi do odwęglania i tworzenia pęcherzyków metanu zlokalizowanych na granicy ziaren, gdzie z czasem dochodzi do mikropęknięć.	Następuje odwęglanie, a propagujące mikropęknięcia znacznie obniżają własności mechaniczne materiału.	Następuje utrata ciągliwości materiału.

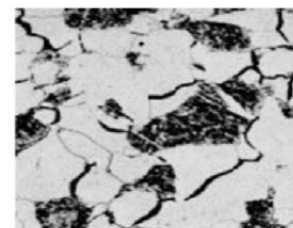
Etap 1:
Odwęglenie i powstawanie pojedynczych pustek na granicach ziaren



Etap 2:
Powstawanie mikropęknięć



Etap 3:
Utrata ciągliwości materiału



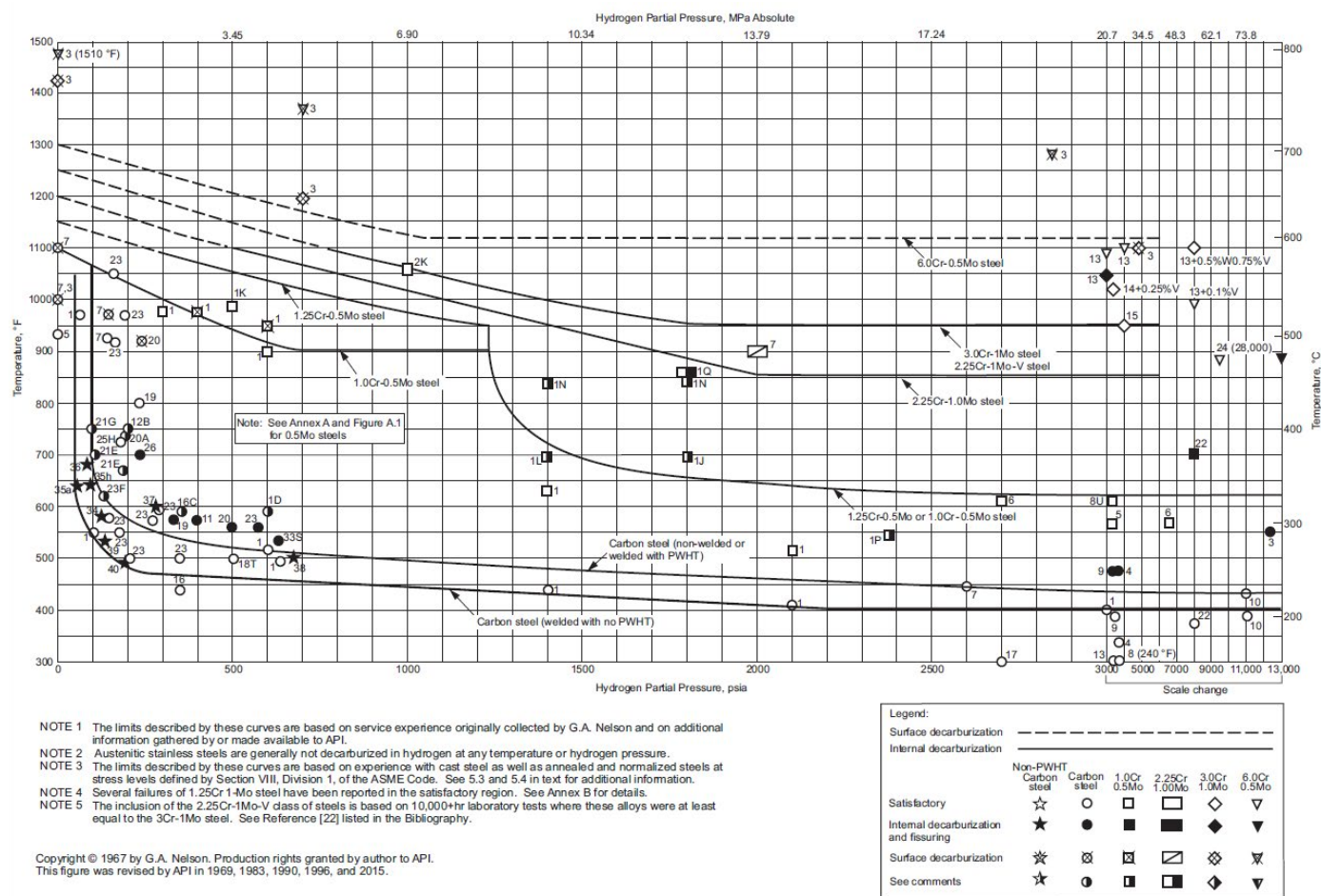
Rys. 2. Schemat powstawania pęcherzy wodorowych (opracowano na podstawie [6])

Na wystąpienie HTHA narażone są przede wszystkim stale węglowe i niskostopowe, które pracują w atmosferze zawierającej wodór. Przyjmuje się, że wysokotemperaturowy atak wodorowy zachodzi w temperaturach powyżej 200°C. Wzrost ciśnienia parcjalnego wodoru oraz czas eksploatacji sprzyjają uaktywnieniu tego mechanizmu degradacji.

Podatność danej stali na wystąpienie wysokotemperaturowego ataku wodorowego można ocenić za pomocą tzw. krzywych Nelsona (rys. 3).

Krzywe Nelsona służą jako narzędzie wspomagające proces doboru odpowiedniego gatunku stali do pracy w środowiskach zawierających wodór.

Ocena podatności na wystąpienie HTHA w danym materiale opiera się głównie na standardzie API RP 941 – Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants [7], w którym do poszczególnych materiałów jest przypisana charakterystyka temperaturowo-ciśnieniowa.



Rys. 3. Wykres Nelsona z API RP 941 [4]

Krzywe Nelsona są zbiorem empirycznych danych historycznych, diagramem, w którym na osi odciętych oznaczono temperaturę, a na osi rzędnych ciśnienie parcjale wodoru, jako warunki panujące w urządzeniu. Punkty na siatce diagramu oznaczają historyczne występowanie HTHA w określonym materiale, dodatkowo rozróżniając je pod względem obróbki cieplnej po spawaniu (PWHT i non PWHT).

Krzywe, przypisane do określonych materiałów, mogą być linią ciągłą lub przerywaną.

- Linia ciągła oznacza występowanie przy określonych parametrach odwęglenia wewnętrznego.
- Linia przerywana oznacza odwęglenie powierzchniowe w odpowiednich parametrach pracy urządzenia.

Krzywe wskazują na możliwość wystąpienia odwęglenia, bazując na określonych parametrach pracy urządzenia. Położenie danego gatunku stali na diagramie wskazuje na większy lub mniejszy element ryzyka występowania HTHA, nie determinuje natomiast jednoznacznie występowania mechanizmu.

ZASADY DIAGNOSTYKI

Jedną z najczęściej stosowanych metod badań nieniszczących podczas diagnostyki urządzeń narażonych na wystąpienie HTHA są badania ultradźwiękowe. Do wykrywania wysokotemperaturowego ataku wodorowego zastosowanie znajdują następujące techniki badań ultradźwiękowych.

1. PA,
2. TFM,
3. TOFD,
4. TULA (ang. TOFD Ultra Low Angle)
5. AUBT (ang. Automated Backscatter Technique)
6. Wyznaczenie współczynnika tłumienia fali ultradźwiękowej na podstawie prędkości propagacji fali podłużnej i poprzecznej.

PA – z ewentualnym ogniskowaniem wiązki – technika jest kluczowa przy wykrywaniu większych klastrów pęcherzy połączonych pęknięciami oraz pęknięć wynikających ze znacznego nasilenia HTHA. Jest to technika uzupełniająca dla TOFD ze względu na możliwość formowania wiązki, pozwala na bardziej szczegółowe określenie umiejscowienia wskazań oraz ich charakteru.

TFM – służy do potwierdzania obecności HTHA i charakterystyki geometrycznej wykrytych wskazań, zapewnia wysoką rozdzielczość przestrzenną „drobnych” wskazań.

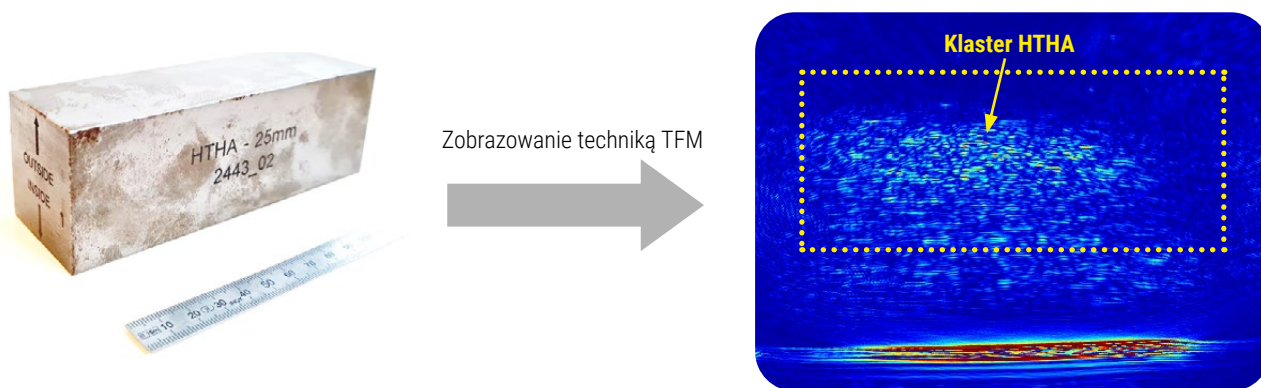
TOFD – technika badania materiału podstawowego i złączy spawanych wraz ze strefą wpływu ciepła (SWC). Zwiększony szum strukturalny (krótkie wskazania) i klastry wskazują na wczesne stadium HTHA. TOFD jest używany jako pierwsza i podstawowa technika przesiewowa.

TULA – technika wykorzystywana do badania materiału podstawowego. Podobnie jak w przypadku TOFD, zwiększone rozpraszanie wsteczne (back-scattering) i klastry w zobrazowaniu A-skan wskazują na występowanie HTHA.

Opracowana przez ekspertów z Urzędu Dozoru Technicznego procedura uwzględnia stosowanie trzech pierwszych wymienionych technik ultradźwiękowych. Jest to podejście rekomendowane przez uznane ośrodki badawcze na całym świecie.

W celu wdrożenia wyżej wymienionej procedury UDT wyposażył laboratorium w odpowiednie defektoskopy (m.in. z funkcją TFM), głowice ultradźwiękowe (PA, TOFD, TULA) oraz próbki odniesienia.

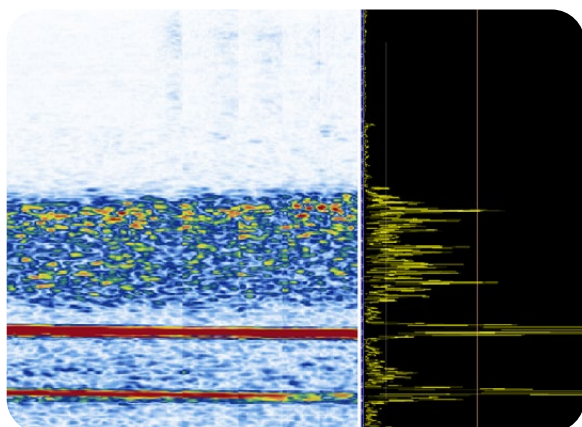
W ramach walidacji metody testowano poszczególne techniki na blokach weryfikacyjnych celem potwierdzenia występowania oczekiwanych wskazań. Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego dysponuje certyfikowanymi próbkami zawierającymi sztucznie wytworzone uszkodzenia wywołane przez HTHA (rys. 4).



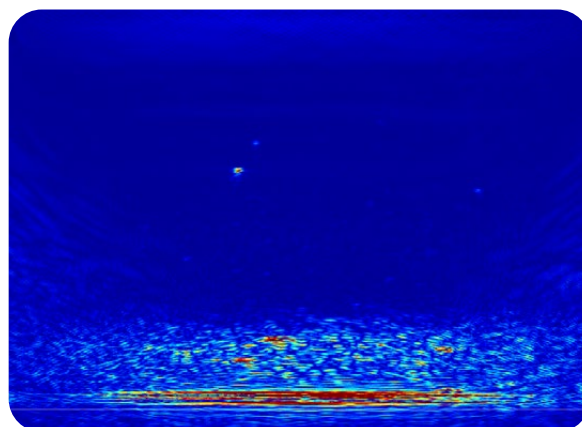
Rys. 4. Próbka odniesienia ze sztucznie wywołaną HTHA

Posiadane próbki odniesienia mają różny poziom nawodorowania, co służy lepszej diagnostyce i weryfikacji ustawień aparatury.

Poniżej przedstawiono zobrazowania dwiema różnymi technikami odniesienia: TFM (rys. 5 a) oraz TULA (rys. 5 b). Oba skany precyzyjnie pokazują wskazania pochodzące od HTHA, ich intensywność oraz różnicę nasilenia w poszczególnych próbkach (rys. 5).



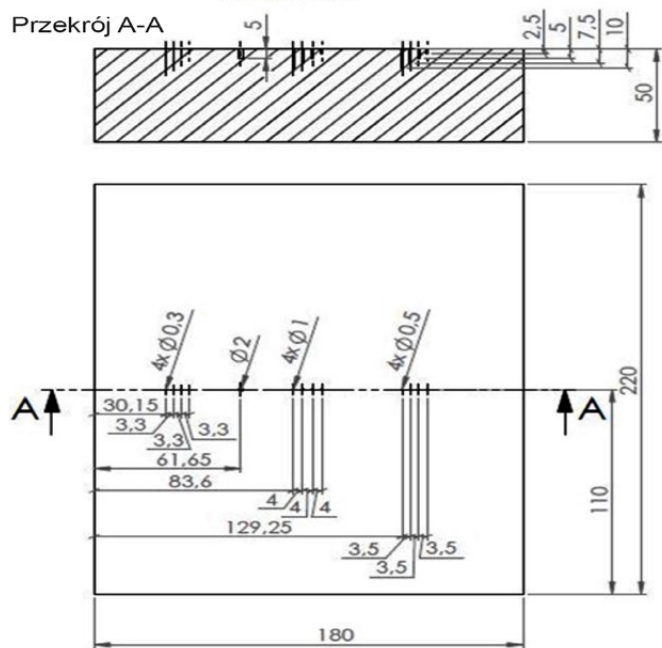
a) Próbka HTHA-25 mm (2443_02), TFM 10 MHz



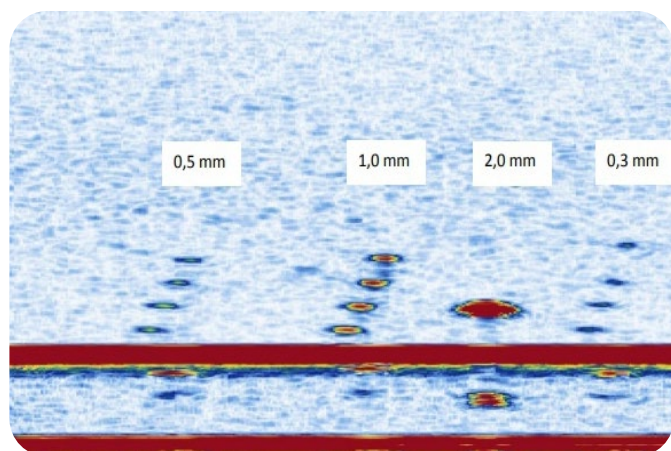
b) Próbka HTHA-25 mm (2443_03), TULA C

Rys. 5. Zobrazowanie HTHA różnymi technikami ultradźwiękowymi

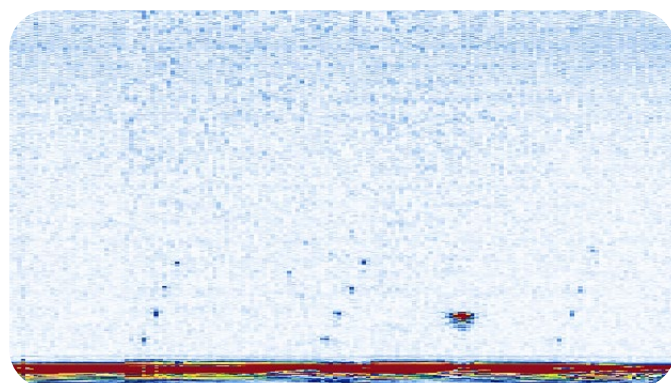
Innym opracowaniem w UDT blokiem referencyjnym służącym do weryfikacji czułości aparatury oraz sprawdzenia wykrywalności reflektorów jest wzorec z otworami typu FBH (z ang. Flat Bottom Hole) o najmniejszej średnicy 0,3 mm (rys. 6).



Rys. 6. Próbką odniesienia z reflektorami FBH



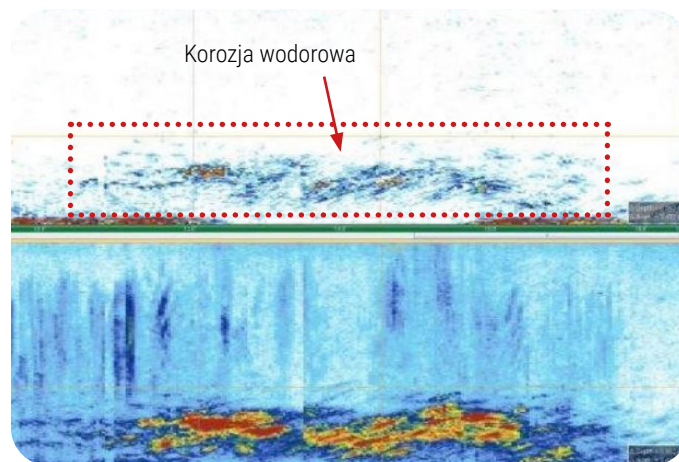
a) Zobrazowanie techniką TULA



b) Zobrazowanie techniką PA TFM 15 MHz

Rys. 7. Zobrazowanie próbki odniesienia z reflektorami FBH z pomocą techniki TULA i TFM

Możliwość wykrycia technikami ultradźwiękowymi otworka płaskodennego o średnicy 0,3 mm jest dowodem uzyskania wysokiej czułości badania. Potwierdza to możliwość detekcji mikropęknięć wielkości kilku ziaren materiału. Jednak odosobnione pęknięcia są rzadkością w przypadku wystąpienia HTHA, podczas badań ultradźwiękowych należy spodziewać się wystąpienia klastrow lub zgrupowań takich mikropęknięć, jak przedstawiono na rysunku poniżej (rys. 8) [4].



Rys. 8. Zobrazowanie Phased Array, głowica kątowna, 64 elementy, B-skan, ogniskowanie, +12 dB (dół) [4]



OCENA I INTERPRETACJA WYNIKÓW

Na podstawie przeprowadzonej akwizycji skanów ultradźwiękowych laboratorium identyfikuje występujące wskazania pod względem noszących znamiona produkcyjnych oraz pochodzących od korozji wodorowej.

Aby zakwalifikować wskazanie jako HTHA, należy potwierdzić je dwiema technikami, np. PA i TULA czy TOFD i TFM.

W ramach oceny nieciągłości pochodzących od HTHA należy wyróżnić cechy charakterystyczne względem stadiów nasilenia oraz możliwości detekcji (tabela 1).

Tabela 1. Charakterystyka poszczególnych stadiów HTHA [5]

	Stadium 1	Stadium 2	Stadium 3	Stadium 4
Rodzaj nieciągłości	Pęcherzyki	Gniazda pęcherzy (klaster), mikroszczeliny (mikropęknięcia)	Mikropęknięcia, Makropęknięcia	Połączone mikropęknięcia generujące znaczne nieciągłości (pęknięcia)
Wymiar nieciągłości	< 50 µm	50–100 µm	100–300 µm	> 300 µm
Technika umożliwiająca wykrycie	Stadium 1 z reguły nie jest wykrywane technikami ultradźwiękowymi	TULA TFM	TULA TFM TOFD	TULA TFM TOFD Phased Array
Możliwości wymiarowania	---	Pojedyncze odosobnione wskazania	Obszar nasilenia wpisany w prostokąt	Spadek 6dB (PA) wymiarowanie (TOFD)

Poszczególne techniki badań ultradźwiękowych charakteryzują się odmiennymi zobrazowaniami, możliwościami wymiarowania i charakteryzowania wskazań.

Ocena nasilenia poszczególnych stadiów ma charakter jakościowy i jest przyrównywana do wielkości zwymiarowanych wskazań. Wskazania pochodzące od HTHA przypisane do każdej z technik powinny być opisane w procedurze badania.

Stadium 1 oraz 2 mogą być wątpliwe w kontekście oceny wyników (dotyczy to głównie techniki TOFD) ze względu na możliwe podobne wskazania pochodzące od izolowanych wtrąceń wynikających z zanieczyszczenia stali.

PODSUMOWANIE

Powyższe rozważanie związane z gwałtownym rozwojem technik inspekcyjnych może skłaniać do stosowania nowego podejścia do oceny stanu technicznego urządzenia. Silna tendencja stosowania badań celowanych wpływa na wykorzystywanie coraz to bardziej zaawansowanych technik badawczych (np. PA-TFM, TULA). Umożliwiają one prognozę i ocenę nawet tak subtelnych uszkodzeń, jak te pochodzące od HTHA.

Aby zarządzać świadomie ryzykiem eksploatacyjnym, szczególnie w tak newralgicznych sektorach przemysłu, jak przemysł chemiczny czy petrochemiczny, konieczne jest podjęcie działań zapewniających podwyższanie poziomu wiedzy i umiejętności inspektora w obszarach interdyscyplinarnych, począwszy od inżynierii materiałowej, a kończąc na zaawansowanych technikach badawczych. Nie bez znaczenia jest także przyjęcie rozwiązań systemowych, które zapewniłyby pozyskiwanie i gromadzenie wiedzy oraz doświadczeń, co umożliwi wykonanie i/lub weryfikację oceny jakościowej wskazań [2].

Literatura:

- Hołownia R., Targoński M. (2022), Wykrywanie wysokotemperaturowego ataku wodorowego (HTHA) technikami ultradźwiękowymi, Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących
- Hołownia R., Łucki M. (2017), Wykrywanie wysokotemperaturowego ataku wodorowego, [cire.pl: https://www.cire.pl/artykuly/materialy-problemo-we/122578-wykrywanie-wysokotemperaturowego-ataku-wodorowego](https://www.cire.pl/artykuly/materialy-problemo-we/122578-wykrywanie-wysokotemperaturowego-ataku-wodorowego)
- Karmaker A., Tamang D., Sanish R. (2015), High Temperature Hydrogen Attack; In Indian Oil Corporation, Haldia Refinery Brief overview of various process units in Haldia Refinery
- Detecting High Temperature Hydrogen Attack (HTHA) Before It's Too Late, [www.eddyfi.com https://www.eddyfi.com/en/appnote/detecting-high-temperature-hydrogen-attack-htha-before-its-too-late](https://www.eddyfi.com/en/appnote/detecting-high-temperature-hydrogen-attack-htha-before-its-too-late)
- Hołownia R., Targoński M. (2022), Procedura wykrywania wysokotemperaturowego ataku wodorowego (HTHA) technikami ultradźwiękowymi PB-UT-HTHA-01/22, opracowanie własne
- Malekmohammadi H., Taghipour M.H. (2008), review on High Temperature Hydrogen Attack (HTHA) damage mechanisms, comparison and introduction of methods applicable for the detection of this phenomena , The 2nd International Conference on Technical Inspection and NDT (TINDT2008) - Tehran, Iran
- API RP 941 – Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants

BADANIA ULTRADŹWIĘKOWE ZŁĄCZY SPAWANYCH ELEMENTÓW CIENKOŚCIENNYCH TECHNIKĄ PHASED ARRAY (PAUT)



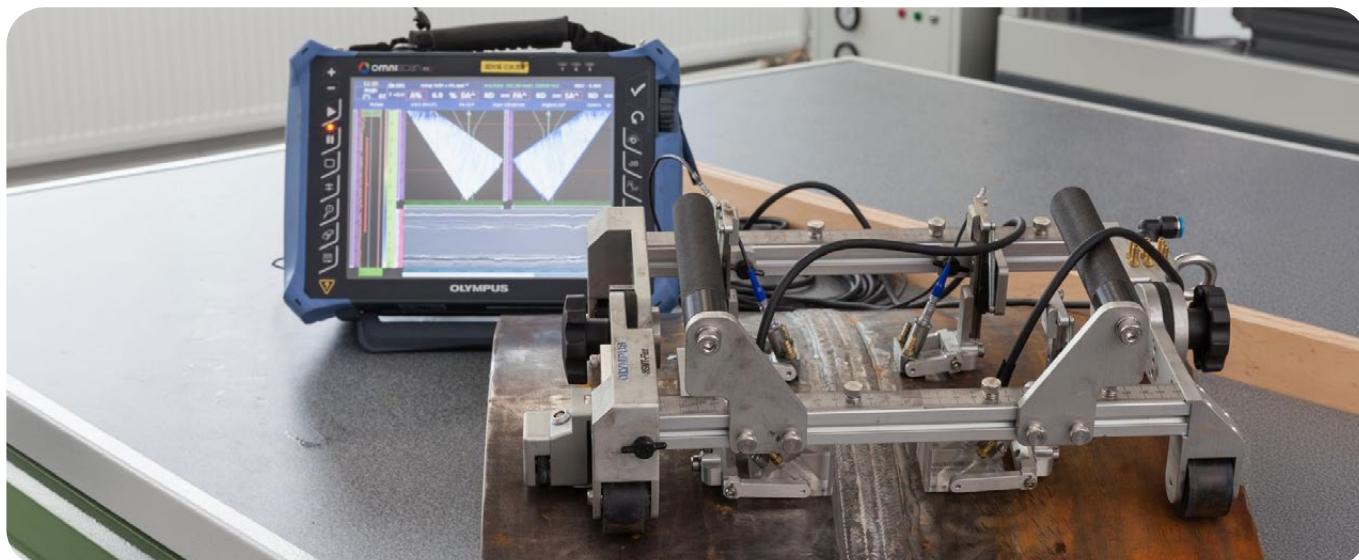
MGR MICHAŁ TARGOŃSKI

Starszy Specjalista ds. Badań Materiałowych
Dział Badań Laboratoryjnych w Warszawie
Urząd Dozoru Technicznego

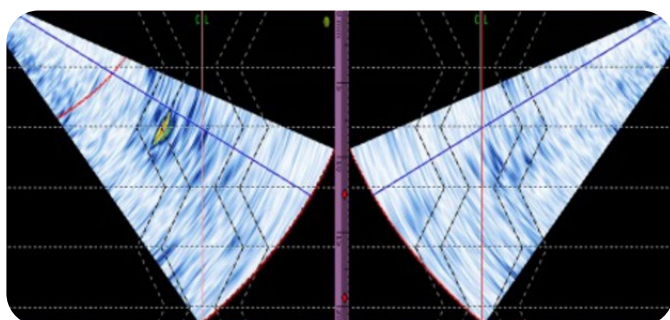


CLDT





Systematyczne i dokładne oceny stanu technicznego urządzeń i instalacji pracujących w przemyśle lub logistyce są obecnie standardem w trosce o bezpieczeństwo techniczne. Posiadając odpowiednie wyposażenie badawcze i know-how, CLDT uczestniczy w ocenie badawczej nie tylko w zakresie badań eksploatacyjnych, ale i w procesach wytwarzania urządzeń i ich elementów, m.in. złączy spawanych. Racjonalne podejście do eksploatacji, napraw, serwisowania lub modernizacji jest elementem zrównoważonego podejścia do zapewnienia bezpieczeństwa technicznego. Może być ono obecne już na etapie produkcji, ponieważ dzięki wydajniejszej kontroli jakości możemy zredukować zużycie materiałów.



Rys. 1. Wizualizacja zobrażenia otrzymywanego podczas badań techniką Phased Array

Stały rozwój w zakresie elektroniki lub automatyki i wciąż rosnące wymagania dla procesu kontroli jakości podczas wytwarzania i eksploatacji urządzeń przemysłowych prowadzą bezpośrednio do ewolucji szeroko pojętych technik badań nieniszczących. Istotnym elementem tego obszaru są badania złączy spawanych. Jedną z częściej stosowanych metod badań złączy spawanych są badania ultradźwiękowe.

Dotychczasowe wykorzystanie badań ultradźwiękowych w tej dziedzinie było obarczone ograniczeniami co do zakresu grubości, w których mogły być one zastosowane. Według norm przedmiotowych PN-EN ISO badania konwencjonalne miały dolną granicę zakresu 8 mm, a dla zaawansowanych technik, jak PAUT i TOFD, było to 6 mm. Poniżej tych granic konieczne było stosowanie badań metodą radiograficzną. Wraz ze znormalizowaniem wymagań techniki PAUT dla badania elementów cienkościennych dolna granica grubości została obniżona do 3,2 mm. W artykule przybliżamy podstawowe informacje związane z wydaniem i stosowaniem norm przedmiotowych.

WYPOSAŻENIE POMIAROWO-BADAWCZE



Rys. 2. Widok urządzenia Skaner Ekoflex (Dział Badań Laboratoryjnych w Warszawie)

Aby wykonywać badania w zakresie omawianej tematyki, przede wszystkim należy posiadać odpowiedni sprzęt, w skład którego wchodzi między innymi specjalistyczny i odpowiednio wyposażony skaner ultradźwiękowy. W Dziale Badań Laboratoryjnych w Warszawie dostępny jest skaner zaadaptowany właśnie do badania spoin cienkościennych elementów rurowych oraz blach [5].

Na zdjęciu (rys. 2) znajduje się skaner EKOFLEX należący do Urzędu Dozoru Technicznego. Przeznaczony jest on do badania złączy obwodowych rur o średnicach w zakresie od 20 do 114 mm (0,8–4,5”), a także złączy spawanych blach o grubości od 3,2 do 8 mm.

Zestaw posiada dwie 32-elementowe głowice o częstotliwości 7,5 MHz wraz z kompletem wymiennych par klinów przeznaczonych do powyższego zakresu średnic. Dzięki temu w badany materiał wprowadzana jest wiązka fal poprzecznych o zadanym zakresie kątowym, a dwie głowice umożliwiają obustronne skanowanie złącza podczas jednego przejazdu skanera.

Mechanizm zawiera zestaw obręczy odpowiednich do profilu średnicy badanego elementu, przy których mocowane są głowice ultradźwiękowe o ustalonym i stałym dystansie, tzw. indeks offset. Przesuw skanera wzdłuż osi złącza umożliwiają koła z enkoderem, który zlicza skanowany dystans.



Podczas badań należy zapewnić stałe doprowadzenie środka sprzęgającego, np. wody, która umożliwi przejście fali ultradźwiękowej na granicy ośrodków klin–stal. Po etapie akwizycji dane są zapisywane w postaci pliku, który podlega dalszej ewaluacji.

WYMAGANIA NORMATYWNE

Normy PN-EN ISO 20601:2019-03 „Badania nieniszczące spoin – Badania ultradźwiękowe – Stosowanie zautomatyzowanej techniki głowicy mozaikowej dla cienkościennych elementów stalowych” [1] oraz PN-EN ISO 4761:2023-06 „Badania nieniszczące spoin – Badania ultradźwiękowe z głowicą mozaikową (UT-PA) dla cienkościennych elementów stalowych – Poziomy akceptacji” [2] stawiają szereg wymagań, które należy spełnić, aby wykonać badanie w poprawny sposób oraz właściwie ocenić otrzymane wyniki.

Za podstawową normę podczas badań złączy spawanych należy uznać PN-EN ISO 5817:2023-08 „Spawanie – Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązek) – Poziomy jakości dla niezgodności spawalniczych” [4]. Norma ta określa trzy poziomy jakości dla niezgodności spawalniczych: B, C lub D, za pomocą których określa się poziom jakości dla niezgodności spawalniczych: B, C lub D.

- Przyjęcie poziomu jakości B, C lub D narzuca konieczność stosowania odpowiedniego poziomu badania C zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 20601:2019-03. Z tym wiąże się odpowiedni poziom akceptacji: AL1, AL2 lub AL3 wg PN-EN ISO 4761:2023-06, predysponowany dla odpowiedniego poziomu jakości wg PN-EN ISO 5817:2023-08.
- W szczególnych przypadkach istnieje możliwość stosowania dodatkowego poziomu badania D. Przykładem sytuacji, która wymaga zastosowania tego poziomu badania, są badania wyrobów o grubości mniejszej niż 3,2 mm lub badania wyrobów o zmieniającej się grubości.

Ustalenia co do wymagań jakościowych mają kluczowe znaczenie podczas oceny złączy spawanych jako spełniające lub niespełniające określonych kryteriów akceptacji.

PROCEDURY BADAWCZE

Stosowanie przywołanych norm oraz zapisów niesie za sobą kolejne wymaganie, tj. opracowanie pisemnej procedury badania. Powinna ona w jasny i czytelny sposób opisywać tok postępowania przy wykonywaniu badania, a także przy ocenie jego wyników. Prawidłowy tok postępowania uwzględnia przygotowanie do badania w postaci opracowania strategii badania.



Podczas opracowania takiej strategii (plan skanowania) należy wziąć pod uwagę szczegóły techniczne wykonanych złączy spawanych, a także możliwy rodzaj i charakter nieciągłości materiałowych. Istotna jest też znajomość ograniczeń stosowanej techniki badawczej.



W tym celu niezbędna jest dokumentacja techniczna zawierająca informacje o sposobie wykonania złączy, metodzie spawania, zastosowanym materiale rodzimym oraz materiale dodatkowym, wymiarach elementu czy stosowanej obróbce cieplnej.



Posiadając te informacje, można zaprojektować badanie, konfigurując prawa opóźnień (zakres kątowy wprowadzonej wiązki), rozdzielczość skanowania czy ustalony odstęp głowicy od złącza, a także inne parametry techniczne.

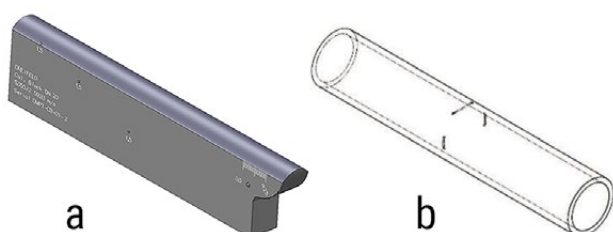
Aby ułatwić ten proces, można posłużyć się specjalistycznym oprogramowaniem, które utworzy schemat badania według zadanych parametrów i wizualizuje konkretny plan skanowania. Jeśli schemat odpowiada oczekiwaniom, można zaaplikować ustawienia w defektoskopie i przystąpić do procesu kalibracji.

PRÓBKİ ODNIESIENIA

Kolejnym istotnym wymaganiem norm przedmiotowych jest posiadanie odpowiednich próbek kalibracyjnych oraz próbek referencyjnych (rys. 3). Próbki te powinny spełniać ściśle określone wymagania dotyczące materiału, z którego zostaną wykonane, geometrii (grubość, średnica) oraz posiadania konkretnych reflektorów odniesienia.

Należy wyróżnić próbkę do kalibracji głowicy i ustanowienia czułości badania oraz próbkę referencyjną do walidacji założeń badania.

- Kalibracja głowicy w założeniach nie odbiega od kalibracji głowicy konwencjonalnej przy uwzględnieniu specyfiki badania głowicami Phased Array. Istotną zmianą jest wzrost czułości badania w stosunku do badań konwencjonalnych oraz dotychczasowej techniki PAUT przez zastosowanie otworka bocznego (SDH – ang. Side-Drilled Hole) o średnicy 1,5 mm, co w oczywisty sposób koreluje ze zmianą zakresu badanych grubości.
- Na próbce referencyjnej, która posiada odpowiednie reflektory odniesienia zlokalizowane w określonych strefach, wykonuje się skan referencyjny, który poprzez wykrycie wszystkich reflektorów potwierdza prawidłowość aplikowanych założeń badania. Reflektorami odniesienia na próbce referencyjnej będą nacięcia na powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej oraz otworek boczny w środku badanej objętości. Jeżeli potwierdzone w trakcie badań ultradźwiękowych wartości metryczne dla reflektorów odpowiadają wymiarom fizycznym, skan kalibracyjny można uznać za prawidłowy.



Rys. 3. Próbka kalibracyjna (a), schemat próbki referencyjnej (b)

BADANIA I ZASTOSOWANIE

Podczas badań PAUT otrzymywane są wyniki w postaci plików danych, które zawierają zobrażenia w różnych przekrojach wiązki ultradźwiękowej. Podlegają one ocenie w konfrontacji z konkretnymi poziomami akceptacji wg PN-ISO 4761:2023-06 [2].

Technika jest bardzo wydajna i przy odpowiednim dostępie do obiektu, przygotowaniu do badania oraz dogodnych warunkach prowadzenia prac możliwe jest wykonanie skanu na kilkudziesięciu, a nawet kilkuset złączach spawanych dziennie.

Główną zaletą wykorzystania zautomatyzowanej techniki głowicy mozaikowej do badań cienkościennych elementów stalowych jest możliwość oceny złącza bezpośrednio po badaniu oraz zapis pliku, który pozwala na odtworzenie badania i weryfikację jego wyników. Tak jak w przypadku pozostałych technik badań ultradźwiękowych, kluczowym elementem całego procesu jest doświadczenie operatora podczas interpretacji wyników. Wymagane jest rozróżnianie wskazań pochodzących od rzeczywistych nieciągłości i wskazań, które pochodzą od geometrii złącza.

Opisana technika znajduje zastosowania przemysłowe wszędzie tam, gdzie występują rurociągi technologiczne, które muszą spełniać wymagania określonego poziomu jakości. Można tu wymienić takie branże, jak: petrochemia, gazownictwo, przemysł spożywczy lub farmaceutyczny itp.

Ultradźwiękowe badanie złączy cienkościennych ma duży potencjał zastosowania także w branży energetycznej, gdzie instalacje kotłowe są wyposażone w liczne rurociągi o mniejszych średnicach. Zaaplikowanie norm przedmiotowych w normie PN-EN ISO 17635:2017:02 „Badanie nieniszczące spoin - Zasady ogólne dotyczące metali” [3], a w kolejnym kroku ujęcie ich w serii norm ISO 15614 [6] oraz PN-EN ISO 9606-1:2017-10 [7] pozwoli na realizację badań ultradźwiękowych na złączach spawanych o grubości poniżej 8 mm wykonanych przy kwalifikowaniu technologii spawania oraz podczas egzaminu spawacza.

Największą korzyścią techniki PAUT jest możliwość zastąpienia nią lub uzupełnienia badań radiograficznych dla elementów cienkościennych. Jest to istotny postęp w stosunku do starszych technik ultradźwiękowych. Dział Badań Laboratoryjnych w Warszawie posiada w swojej ofercie badania ultradźwiękowe złączy spawanych o grubości od 3,2 do 8 mm wykonanych na rurach o średnicach od 20 do 114 mm oraz badania cienkościennych złączy spawanych wykonanych na elementach płaskich.



Literatura:

1. PN-EN ISO 20601:2018 Badania nieniszczące spoin - Badania ultradźwiękowe - Stosowanie zautomatyzowanej techniki głowicy mozaikowej dla cienkościennych elementów stalowych
2. PN-ISO 4761:2023-06 Non-destructive testing of welds – Phased array ultrasonic testing (UTPA) for thin-walled steel components – Acceptance levels
3. PN-EN ISO 17635:2017:02 Badanie nieniszczące spoin - Zasady ogólne dotyczące metali
4. PN-EN ISO 5817:2023-08 Spawanie -- Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką) -- Poziomy jakości dla niezgodności spawalniczych
5. Laboratorium UDT w Warszawie <https://www.udt.gov.pl/118-udt/laboratorium-cldt?start=10>
6. Seria norm ISO 15614 „Kwalifikowanie technologii spawania”
7. PN-EN ISO 9606-1:2017-10 Egzamin kwalifikacyjny spawacza. Spawanie. Część 1: Stale

OCENA STANU TECHNICZNEGO ZBIORNIKÓW MAGAZYNOWYCH Z ZASTOSOWANIEM TECHNIKI PHASED ARRAY



MGR INŻ. JACEK GRZEŚKOWIAK

Główny Specjalista ds. Badań Urządzeń Technicznych
Działu Badań Laboratoryjnych w Poznaniu
Urząd Dozoru Technicznego

Badania ultradźwiękowe (UT) są jedną z powszechnie już wykorzystywanych metod nieniszczących badań materiałowych. Bazują na wykorzystaniu fal dźwiękowych wysokiej częstotliwości rozprawdzanych do badanego materiału za pomocą głowicy ultradźwiękowej. Napotykanie nieciągłości, takie jak pęknięcia czy rozwarstwienia, powodują, że część fali jest odbijana i rejestrowana. Analiza zebranych danych z odbić pozwala na detekcję i ocenę defektów materiałowych.

W ramach metody UT istnieje kilka technik badawczych. Wyróżnić można np. zaawansowaną technikę Phased Array (PAUT), która wykorzystuje głowice wieloprzetwornikowe. Przetworniki generują falę ultradźwiękową wytwarzaną z określonym opóźnieniem. Umożliwia to kształtowanie pod różnymi kątami wiązki ultradźwiękowej. Technika PAUT znajduje zastosowanie szczególnie do obrazowania defektów, takich jak pustki lub wżery korozyjne. Z jej wykorzystaniem można również oceniać grubość takich elementów, jak ścianki zbiorników magazynowych.

Magazynowanie ropy naftowej i produktów naftowych jest kluczowym elementem infrastruktury energetycznej i przemysłowej. Zbiorniki magazynowe są zaprojektowane tak, aby minimalizować ryzyko wycieków i emisji szkodliwych substancji do środowiska. Umożliwiają przechowywanie dużych ilości produktów ropopochodnych w sposób ekonomiczny i bezpieczny. Dzięki nim możliwe jest utrzymanie ciągłości dostaw paliw i innych produktów naftowych, co jest niezbędne dla funkcjonowania wielu sektorów gospodarki.

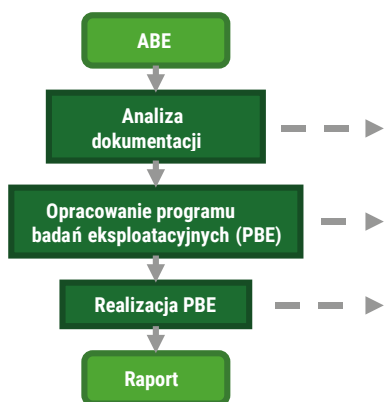
Rozwój przemysłu rafineryjnego i petrochemicznego w Polsce przyczynia się do wzrostu znaczenia bezpieczeństwa eksploatacji zbiorników przeznaczonych do magazynowania produktów naftowych przy jednoczesnym zwiększaniu ich zdolności magazynowej. Biorąc pod uwagę ilość magazynowanych produktów, integralność mechaniczna zbiorników odgrywa decydującą rolę podczas eksploatacji dla bezpieczeństwa otoczenia ludzi, mienia i środowiska.

ANALIZA BEZPIECZEŃSTWA EKSPLOATACJI

Analiza ABE jest to udokumentowany proces obejmujący identyfikację zagrożeń związanych z eksploatacją urządzenia, określenie potencjalnych mechanizmów degradacji i miejsc ich występowania oraz sposobu detekcji przy zastosowaniu odpowiednich badań diagnostycznych, mający na celu ocenę przydatności urządzenia do dalszego bezpiecznego użytkowania w określonym okresie. Proces jest realizowany przez UDT, na wniosek i przy udziale eksploatującego.

Jednym z podstawowych narzędzi do oceny stanu technicznego urządzeń w przemyśle, w tym zbiorników magazynowych, stały się programy eksploatacyjne wykorzystujące nowoczesne, nieinwazyjne techniki badawcze, tj. NDT (ang. Nondestructive Testing). W Urzędzie Dozoru Technicznego opracowano specyfikację techniczną WUDT-UC-ABE:07.2020 „Warunki Urzędu Dozoru Technicznego w zakresie planowania inspekcji zbiorników beciśnieniowych i niskociśnieniowych, stalowych o osi pionowej przeznaczonych do magazynowania materiałów ciekłych zapalnych” [1]. Wytyczne te stosuje się dla zbiorników podlegających przepisom ustawy o dozorze technicznym [2] oraz rozporządzenia Ministra Gospodarki w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego, jakim powinny odpowiadać zbiorniki beciśnieniowe i niskociśnieniowe przeznaczone do magazynowania materiałów ciekłych zapalnych [3].

Schemat analizy ABE



Obszar szczególnie narażony na działalność mechanizmów degradacji: strefa krytyczna
 Metody badawcze: np. badania ultradźwiękowe
 Realizacja badań UT np. za pomocą przyrządu ISONIC 3510

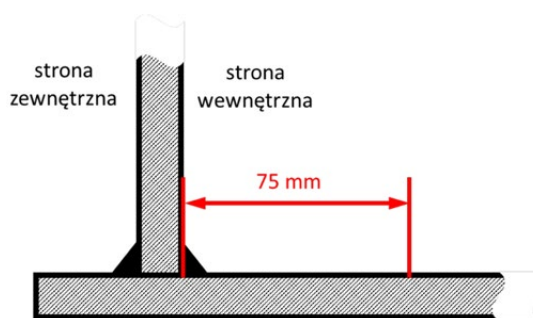
Rys. 1. Schemat analizy ABE

Szczególną rolę w analizie bezpiecznej eksploatacji (ABE) odgrywa ocena potencjalnych mechanizmów degradacji [4] [5]. Przy identyfikacji ich aktywności należy wziąć pod uwagę fakt, że podczas pracy zbiornika jednocześnie mogą być aktywne różne mechanizmy degradacji.

OKREŚLENIE MECHANIZMÓW DEGRADACJI

Tempo degradacji jest zmienne w czasie. W pewnych przypadkach uszkodzenia powodowane przez jeden mechanizm mogą postępować do momentu, w którym inny mechanizm zaczyna dominować i determinuje tempo uszkodzania zbiornika. Ocena oddziaływania mechanizmów degradacji obejmuje efekt kumulacji uszkodzeń od każdego mechanizmu degradacji.

Biorąc pod uwagę aktywność mechanizmów degradacji i ich wpływ na integralność mechaniczną zbiornika, można stwierdzić, że spośród wszystkich elementów zbiornika dno wraz ze strefą krytyczną, pierwsza carga zbiornika oraz dach zbiornika są najbardziej narażonymi elementami.



Rys. 2. Schemat poglądowy strefy krytycznej

Strefa krytyczna – część dna zbiornika o szerokości 75 mm (około 3 cali) od powierzchni wewnętrznej płaszcza mierzona w kierunku środka zbiornika. Jest to obszar szczególnie narażony na zmęczenie.

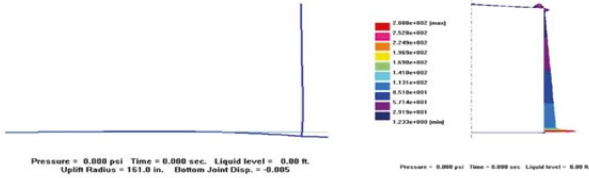
Oslabienie całej konstrukcji zbiornika może wynikać z różnych przyczyn, na przykład ubytku materiału (pocienienia lub wżeru), zarówno od strony magazynowanego produktu, jak też od strony fundamentu. Dodatkowo zbiorniki są poddawane cyklicznym zmianom ciśnienia hydrostatycznego podczas ich napełniania i opróżniania. Zmiany ciśnienia wewnątrz zbiornika wywołują głównie zmianę poziomu naprężeń w spoinach pachwinowych pomiędzy płaszczem a pierścieniem wzmacniającym dno zbiornika.

PRZYKŁADOWE NAPRĘŻENIA WYSTĘPUJĄCE W ZBIORNIKACH PODCZAS EKSPLOATACJI

Zbiornik o średnicy ok. 9,1 m i wysokości ok. 9,8 m

Medium
Ciecz o gęstości 0,95 kg/dm³

Przypadek 1: pusty zbiornik bez ciśnienia wewnętrznego

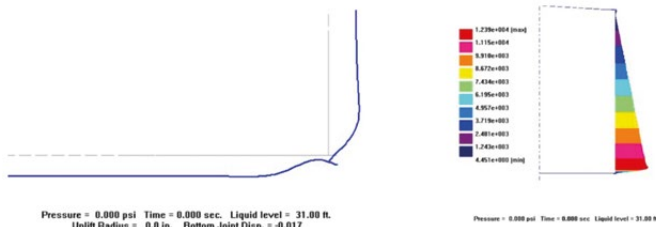


Rys. 3. Przemieszczenie dna ukazane przy 100-krotnym powiększeniu

Rys. 4. Naprężenia zredukowane, maks. wartość 280 psi

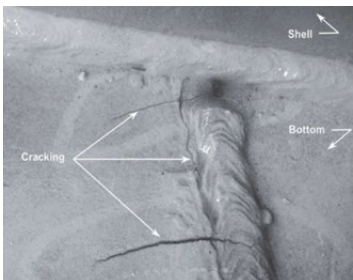
Zródło: Study to Establish Relations for the Relative Strength of API 650 Cone Roof Roof-to-Shell and Shell-to-Bottom Joints, Final Report February, 2005, Thunderhead Engineering Consultants

Przypadek 2: pełny zbiornik (poziom medium 31 ft) bez ciśnienia wewnętrznego



Rys. 5. Przemieszczenie dna ukazane przy 100-krotnym powiększeniu

Rys. 6. Naprężenia zredukowane, maks. wartość 12 390 psi



Rys. 7. Pęknięcia w strefie krytycznej [7]



Rys. 8. Korozja wżerowa od strony fundamentu (występuje również od strony produktu)

ZAAWANSOWANA APARATURA BADAWCZA

Ocena stanu technicznego strefy krytycznej przeprowadzana jest w UDT z wykorzystaniem specjalnie do tego przeznaczonych urządzeń ISONIC 3510. Jest to defektoskop ultradźwiękowy Smart Phased Array wraz z rejestratorem oraz dwoma dodatkowymi kanałami dla konwencjonalnych badań ultradźwiękowych.

Cechą odróżniającą defektoskop ISONIC 3510 od dostępnych na rynku defektoskopów wykorzystujących technikę automatycznych badań głowicą mozaikową jest unikatowe oprogramowanie, standaryzujące uzyskane wyniki badań do rzeczywistej geometrii obiektu. Dzięki temu uzyskuje się prosty w interpretacji obraz nieciągłości zlokalizowanych w badanej strefie.

Możliwy jest bezpośredni pomiar badanych grubości 6–60 mm. Sprzęt i oprogramowanie umożliwia badanie strefy krytycznej dzięki innym kątom wprowadzenia wiązki ultradźwiękowej niż w przypadku standardowych defektoskopów ultradźwiękowych. Zastosowanie tej metody badawczej pozwala na ocenę strefy krytycznej od strony zewnętrznej zbiornika (bez potrzeby jego opróżniania).

BADANIE STREFY KRYTYCZNEJ ZBIORNIKA MAGAZYNOWEGO

Urządzenie przeznaczone do badania techniką Phased Array (PA) strefy krytycznej zbiornika na długości do 100 mm, pozwalające na wykrycie m.in.:

- korozji po stronie fundamentu,
- korozji po stronie produktu,
- pęknięć i innych nieciągłości w złączach spawanych.



Rys. 9. ISONIC 3510 wraz z płytą próbną

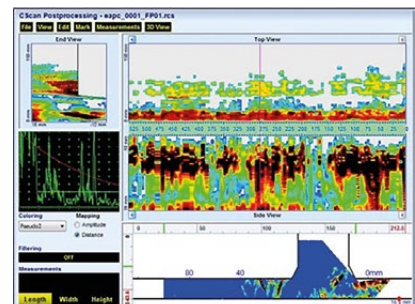
Wyposażone w:

- 32-elementową głowicę PA o częstotliwości 5 MHz,
- 16-elementową głowicę PA o częstotliwości 5 MHz,
- enkoder umożliwiający pomiar odcinka o dł. do 1,5 m,
- oprogramowanie umożliwiające analizę wyników.



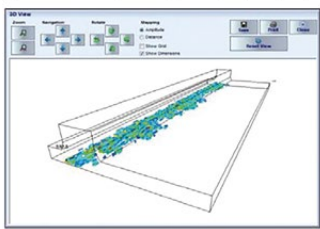
Rys. 10. Sonda PA 32-elementowa [6]

Możliwość ustalenia geometrii badanego obszaru pozwala na przestrzenną lokalizację nieciągłości złączy spawanych oraz pierścienia wzmacniającego, zarówno od strony fundamentu, jak i produktu.

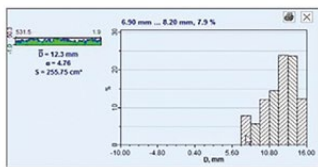


Rys. 11. Przykładowy pomiar strefy krytycznej [6]

Fragment dna pod spoiną łączącą dno z płaszczem

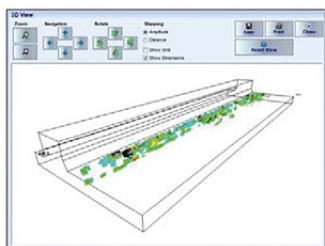


Rys. 12. Fragment pomiaru [6]

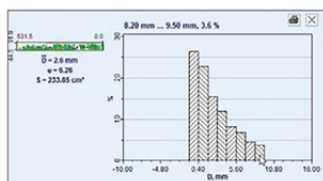


Rys. 13. Statyczna analiza pozostałej grubości dna [6]

Fragment strefy krytycznej od strony produktu

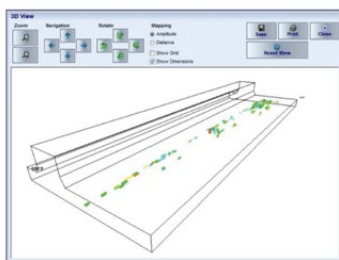


Rys. 14. Fragment pomiaru [6]

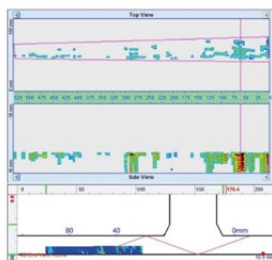


Rys. 15. Statyczna analiza ubytku materiału po stronie produktu [6]

Fragment strefy krytycznej od strony fundamentu



Rys. 16. Fragment pomiaru [6]



PERSPEKTYWY

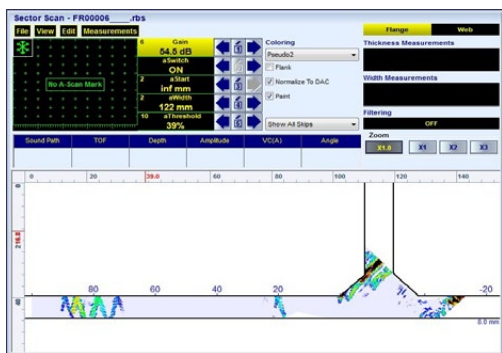
Kompleksowe analizy stanu technicznego m.in. zbiorników prowadzone są z wykorzystaniem nowoczesnych metod badawczych. Wśród nich szczególnie miejsce zajmują te, które nie wymagają lub minimalizują postoje w pracy. Należą do nich m.in. emisja akustyczna czy skanowanie grubości ścianek metodą ultradźwiękową. Zastosowanie w badaniach urządzenia ISONIC 3510 stanowi istotne uzupełnienie nowoczesnych metod badań zbiorników bezciśnieniowych i niskociśnieniowych przeznaczonych do magazynowania materiałów ciekłych zapalnych.



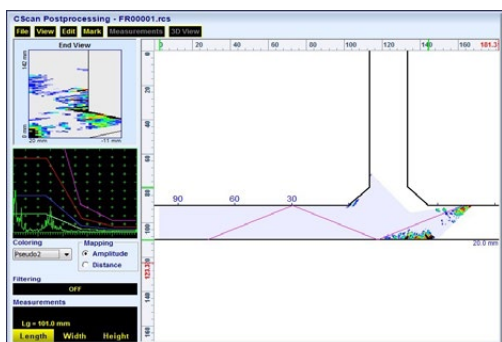
Literatura:

1. WUDT-UC-ABE:07.2020 „Warunki Urzędu Dozoru Technicznego w zakresie planowania inspekcji zbiorników bezciśnieniowych i niskociśnieniowych, stalowych o osi pionowej przeznaczonych do magazynowania materiałów ciekłych zapalnych”.
2. Ustawa z dnia 21 grudnia 2000 r. o dozorcze technicznym (Dz.U. z 2024 poz. 1194) <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20001221321/U/D20001321Lj.pdf>
3. Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 18 września 2001 r. w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego, jakim powinny odpowiadać zbiorniki bezciśnieniowe i niskociśnieniowe przeznaczone do magazynowania materiałów ciekłych zapalnych (Dz.U. Nr 113, poz. 1211, z późn. zm.). <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20011131211/O/D20011211.pdf>
4. Klinkosz T. „Analiza mechanizmów degradacji”, magazyn UDT „Inspektor” wydanie specjalne Chemia, petrochemia, rafineria”, 2024 https://www.udt.gov.pl/images/INSPEKTOR_CHEMIA_WCAG.pdf
5. API RP 571 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry ANSI/API RECOMMENDED PRACTICE 571 THIRD EDITION, MARCH 2020
6. SONOTRON NDT, ISONIC 3510, [www.sonotronndt.com](http://www.sonotronndt.com/APPLICATIONS/PA_APPS/PA_APP_STORE/ISONIC_PA_EXPERT_A_RING.pdf), http://www.sonotronndt.com/APPLICATIONS/PA_APPS/PA_APP_STORE/ISONIC_PA_EXPERT_A_RING.pdf
7. API RP 575 Inspection Practices for Atmospheric and Low-Pressure, Storage Tanks, THIRD EDITION, APRIL 2014

Rys. 16. Obraz z ekranu z defektoskopu podczas badania strefy krytycznej przedstawiającej punktową korozję wżerową od strony produktu w odległości 20 mm i od 60-90 mm oraz korozję od strony fundamentu



Rys. 17. Obraz z ekranu defektoskopu podczas badania strefy krytycznej z powierzchniową korozją od strony fundamentu zbiornika



OKREŚLENIE GRUBOŚCI ELEMENTÓW Z KOROZJĄ WŻEROWĄ METODĄ STATYSTYCZNĄ



DR INŻ. MARIUSZ ŁUCKI

Główny Specjalista ds. Rozwoju Badań Laboratoryjnych
Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego
Urząd Dozoru Technicznego



CLDT



MGR INŻ. JACEK GRZEŚKOWIAK

Główny Specjalista ds. Badań Urządzeń Technicznych
Działu Badań Laboratoryjnych w Poznaniu
Urząd Dozoru Technicznego



MGR INŻ. JAKUB KOKOSIŃSKI

Starszy Specjalista Urządzeń Ciśnieniowych
Departament Techniki
Urząd Dozoru Technicznego



Znaczna część zbiorników przeznaczonych do magazynowania materiałów ciekłych zapalnych jest eksploatowana od ponad trzydziestu lat. Stale niskowęglowe, wykorzystywane do ich budowy, już na etapie produkcji często były obciążone różnego rodzaju wadami technologicznymi. Ich jakość obniżały też niejednorodności strukturalne i chemiczne oraz wtrącenia niemetaliczne (głównie związki siarki). Długotrwała eksploatacja zbiorników powoduje rozwój uszkodzeń w materiale oraz jego pocienienie wywołane oddziaływaniem magazynowanych materiałów. Rozwój uszkodzeń w warunkach obciążeń roboczych może prowadzić do ich niestabilnego stanu i awarii, której skutkiem może być wyciek ze zbiornika powodujący skażenie środowiska naturalnego. Skalę problemu pokazują statystyki [1]. Zgodnie z nimi rozwój uszkodzeń korozyjnych w przemyśle petrochemicznym, mimo stosowania coraz lepszych powłok ochronnych, należy do najczęstszych przyczyn awarii zbiorników (ok. 30%), a co za tym idzie, szkód dla środowiska naturalnego.

Dlatego w przemyśle chemicznym i petrochemicznym poszukuje się nowych rozwiązań w dziedzinie badań diagnostycznych, które pozwolą na dokładną ocenę stanu technicznego eksploatowanych zbiorników magazynowych oraz poprawę ich niezawodności i bezpieczeństwa pracy.

Jedną z takich metod jest Analiza Bezpiecznej Eksploatacji (ABE) wykonywana przez Urząd Dozoru Technicznego. Pozwala ona na określenie obecnego stanu technicznego zbiornika na podstawie analizy historii jego eksploatacji, zidentyfikowanych mechanizmów degradacji oraz przeprowadzonych specjalistycznych badań.

Bardzo dobrym rozszerzeniem analizy, informującym o poziomie aktywności korozji wżerowej, może być przeprowadzenie losowych pomiarów grubości zgodnie z teorią Gumbela [4]. Wynikiem analizy statystycznej (bazującej na wartościach ekstremalnych) jest wartość największego wżeru (pocienienia) dla całkowitej powierzchni badanego urządzenia ze ściśle określonym prawdopodobieństwem jego wystąpienia.

TERMINY I DEFINICJE

Badania UT-scan – badania ultradźwiękowe wykonane w sposób ciągły

Funkcja rozkładu gęstości prawdopodobieństwa – funkcja prawdopodobieństwa $f(x)$ znalezienia na losowo wybranym płacie kontrolnym maksymalnej głębokości wżeru o wartości x

Funkcja skumulowanej gęstości prawdopodobieństwa – funkcja prawdopodobieństwa, dla którego maksymalny wżer znaleziony na losowo wybranym płacie kontrolnym jest mniejszy lub równy wartości maksymalnej X_{\max}

Płatek kontrolny – wydzielona powierzchnia z obszaru narażenia, która podlega badaniom techniką UT-scan

Obszar narażenia – określony w trakcie analizy obszar potencjalnego występowania mechanizmu degradacji (pocienienia)

Komponent – element składowy urządzenia, o odrębnych właściwościach i/lub warunkach pracy, będący przedmiotem analizy aktywności mechanizmów degradacji (pocienienia)

Parametry znaczące – parametry istotne/krytyczne/charakterystyczne dla analizowanego komponentu, urządzenia bądź procesu (np.: ciśnienie, temperatura, rodzaj medium, materiały konstrukcyjne), mające istot-

ny wpływ na aktywność mechanizmów degradacji (pocienienia) zachodzących w tym komponencie

OPIS METODOLOGII

Metodologia została opisana na podstawie przykładu wykonania ultradźwiękowych pomiarów grubości zbiornika magazynowego o średnicy zewnętrznej wynoszącej 30 m. Sposób prowadzenia oceny oparto na statystycznej teorii Gumbela.

Analizę przeprowadzono zgodnie z poniższymi krokami.

WYZNACZENIE OBSZARU NARAŻENIA

W pierwszej kolejności należy przeprowadzić ocenę obiektu pod względem jednorodności oddziaływania czynnika korozyjnego, a więc wyodrębnić w obiekcie komponenty. Obszar narażenia wyznacza się na podstawie analizy aktywności procesu korozyjnego. Powinien on obejmować strefę o najwyższej aktywności korozji wżerowej.

W przypadku zbiorników magazynowych najczęściej będzie to obszar płaszczka zbiornika do wysokości ok. 50 cm od jego dna. W rurociągach może to być z kolei ich dolna część, w której istnieje zwiększone ryzyko gromadzenia się agresywnych osadów.

Wyznaczenie obszaru narażenia powinna poprzedzać analiza parametrów znaczących, w tym:

- historii eksploatacji,
- parametrów konstrukcyjnych,
- rodzaju czynnika korozyjnego,
- szybkości przepływu,
- występowania osadów (zanieczyszczenia),
- materiału konstrukcyjnego.

W rozpatrywanym przypadku powierzchnia obszaru narażenia wynosi $47,1 \text{ m}^2$ ($30 \text{ m} \cdot \pi \cdot 0,5 \text{ m}$), 30 m – średnica zbiornika, 0,5 m – wysokość strefy narażenia.

WYZNACZENIE PŁATÓW KONTROLNYCH

W obszarze narażenia wyznacza się płyty kontrolne, na których przeprowadzane są badania ultradźwiękowe techniką skanowania w sposób ciągły (UT-scan) z pełnym pokryciem powierzchni płyta. Ważne jest, żeby próbkowanie (wyznaczenie płyt kontrolnych) realizowane było w sposób losowy. Łączna powierzchnia płyt kontrolnych powinna stanowić od 2% do 5% obszaru narażenia.

Przyjmując dla rozważanego przypadku, że płyty kontrolne będą stanowiły 4% powierzchni obszaru narażenia, to powierzchnia badania będzie wynosić $1,9 \text{ m}^2$ ($4\% \text{ z } 47,1 \text{ m}^2 = 1,9 \text{ m}^2$).

Zakładając, że pojedynczy płatek kontrolny będzie kwadratem o boku 10 cm, całkowita liczba płyt kontrolnych, które należy zbadać, wynosi 190 [$1,9 \text{ m}^2 : (0,1 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ m}) = 190$].

WYKONANIE BADAŃ

Na każdym z losowo wybranych płyt kontrolnych należy wykonać ultradźwiękowy pomiar grubości. Badaniom należy poddać 100% powierzchni płyt. W trakcie pomiarów dla każdego z płyt kontrolnych należy wyznaczyć wartość maksymalnego pocienienia, tj. maksymalną głębokość wżeru.

Po przebadaniu wszystkich płyt kontrolnych należy określić częstotliwość występowania pocienienia (wżeru) o danej wartości.

STABELARYZOWANIE WARTOŚCI POMIAROWYCH I OBLICZENIOWYCH

Dla otrzymanych danych należy przeprowadzić pozycjonowanie (ranking) pocienienia w zależności od jego wielkości (od najmniejszej do największej głębokości) i przypisać im odpowiednie parametry, takie jak: częstości występowania, funkcja gęstości prawdopodobieństwa oraz funkcja skumulowanej gęstości prawdopodobieństwa.

Dla przyjętych zakresów wielkości pocienienia/wżeru (pierwsza kolumna tabeli 1) określa się częstość pocienienia – parametr A (druga kolumna tabeli 1). Następnie wyznacza się funkcję gęstości prawdopodobieństwa – parametr f (trzecia kolumna tabeli 1) oraz funkcji rozkładu skumulowanej gęstości prawdopodobieństwa – parametr F (czwarta kolumna tabeli 1).

<p>Funkcję gęstości prawdopodobieństwa określa się zgodnie z zależnością:</p> <p>$f = A/(N+1)$, gdzie:</p> <p>A – częstość występowania pocienienia o danej wielkości,</p> <p>N – całkowita liczba wartości maksymalnych uzyskanych z pomiarów.</p>	<p>Skumulowaną gęstość prawdopodobieństwa określa się zgodnie z zależnością:</p> <p>$F = \sum f$, gdzie:</p> <p>F – skumulowana gęstość prawdopodobieństwa.</p>
--	--

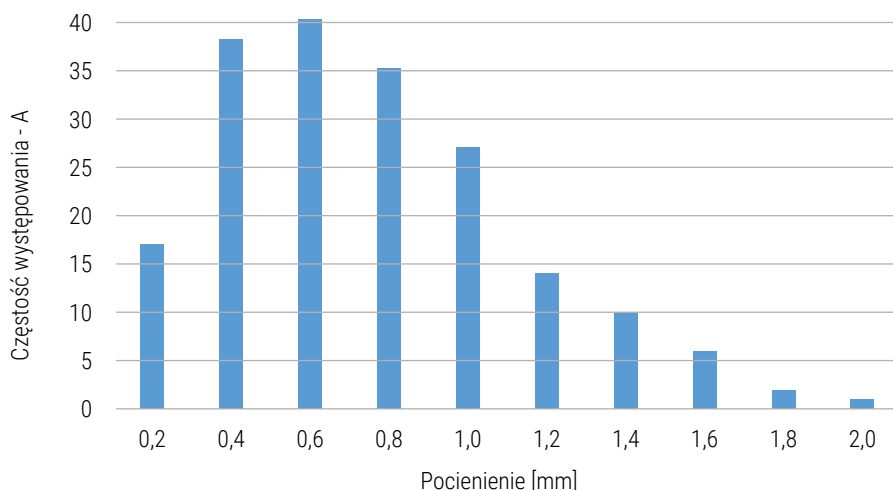
W rozpatrywanym przypadku analizie podano dane pomiarowe, które zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Stabelaryzowana forma analizy wyników pomiarów

Pocienienie [mm]	Częstość występowania pocienienia o danej wielkości (A)	Funkcja gęstości prawdopodobieństwa $f = A/(N+1)$	Skumulowana gęstość prawdopodobieństwa $F = \sum f$
0,2	17	0,089	0,089
0,4	38	0,199	0,288
0,6	40	0,209	0,497
0,8	35	0,183	0,681
1,0	27	0,141	0,822
1,2	14	0,073	0,895
1,4	10	0,052	0,948
1,6	6	0,031	0,979
1,8	2	0,010	0,990
2,0	1	0,005	0,995
Całkowita liczba (N)	$\sum = 190$		

SPORZĄDZENIE WYKRESU CZĘSTOŚCI WYSTĘPOWANIA POCIENIENIA

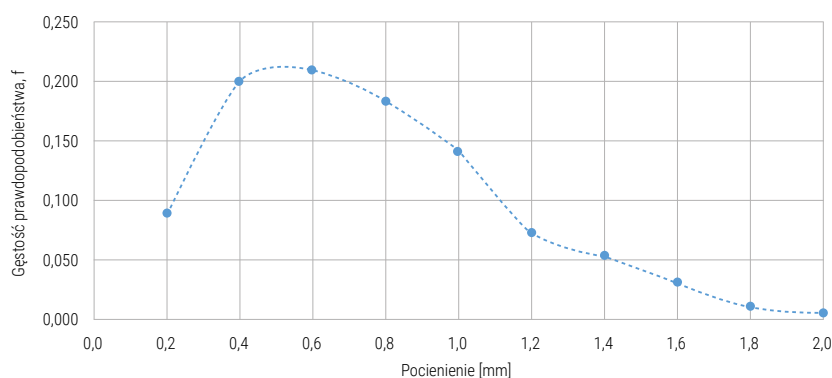
Na podstawie danych zestawionych w tabeli 1 sporządza się wykres częstości występowania pocienia, A (rys. 1).



Rys. 1. Częstość występowania pocienień o danej wielkości, A

SPORZĄDZENIE WYKRESU FUNKCJI GĘSTOŚCI PRAWDOPODOBIEŃSTWA

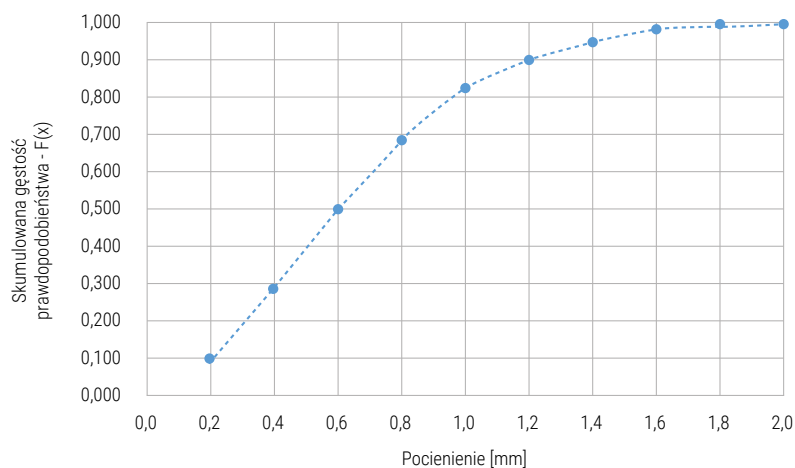
Na podstawie danych z tabeli 1 sporządza się wykres funkcji gęstości prawdopodobieństwa – f dla pocienień o danej wartości (rys. 2).



Rys. 2. Gęstość prawdopodobieństwa wystąpienia pocienień o danej wartości, f

SPORZĄDZENIE WYKRESU FUNKCJI SKUMULOWANEJ GĘSTOŚCI PRAWDOPODOBIEŃSTWA

Na podstawie danych z tabeli 1 sporządza się wykres funkcji skumulowanej gęstości prawdopodobieństwa $F(x)$ dla poszczególnych wielkości pocienień (rys. 3).



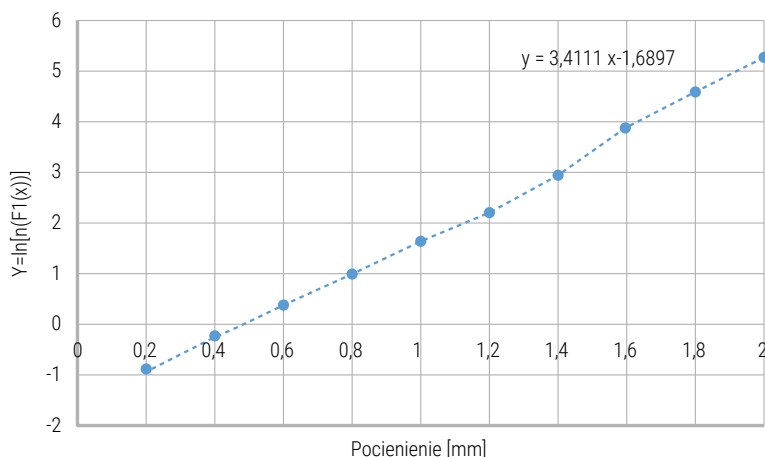
Rys. 3. Skumulowana gęstość prawdopodobieństwa wystąpienia pocienień o danej wartości, $F(x)$

WERYFIKACJA ZGODNOŚCI SPORZĄDZONEGO ROZKŁADU FUNKCJI SKUMULOWANEJ GĘSTOŚCI PRAWDOPODOBIEŃSTWA Z PRZYJĘTYM MODELEM STATYSTYCZNYM

W celu weryfikacji zgodności sporządzonego rozkładu funkcji skumulowanej gęstości prawdopodobieństwa z przyjętym modelem statystycznym, opisanym funkcją Gumbela (dla wartości ekstremalnych), sporządzono jego rozkład zgodnie z poniższą zależnością:

$$Y = -\ln[-\ln(F_1(x))]$$

Stopień liniowości wykresu funkcji $Y = -\ln[-\ln(F_1(x))]$ wskazuje na wielość dopasowania do rozkładu typu Gumbela (rys. 4).



Rys. 4. Dopasowanie liniowe dla rozkładu typu Gumbela

WYZNACZENIE MODELU – TEORETYCZNEGO ROZKŁADU FUNKCJI GUMBELA

Wyznaczenie modelu – teoretycznego rozkładu funkcji Gumbela, wymaga w pierwszej kolejności określenia z wykresu funkcji $Y = -\ln[-\ln(F_1(x))]$ parametrów λ i α .

Parametr λ związany jest ze współczynnikiem kierunkowym prostej. Parametr α odpowiada wielkości przy przejściu przez oś dla $Y = 0$.

W rozpatrywanym przypadku parametry wynoszą:

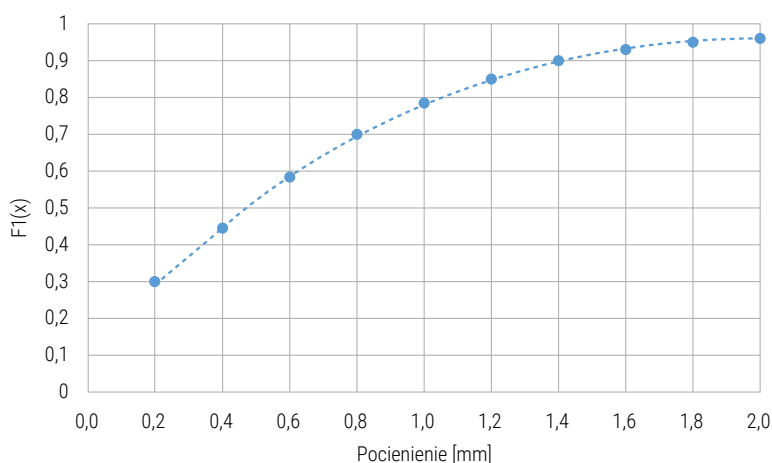
$$\lambda = 0,293,$$

$$\alpha = 0,490.$$

Znając parametry λ i α , możemy skonstruować teoretyczny model rozkładu za pomocą funkcji Gumbela zgodnie z poniższym wzorem:

$$F_1(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\lambda}{\alpha}\right)\right]; \quad -\infty \leq x \leq \infty$$

Otrzymano wykres (rys. 5).

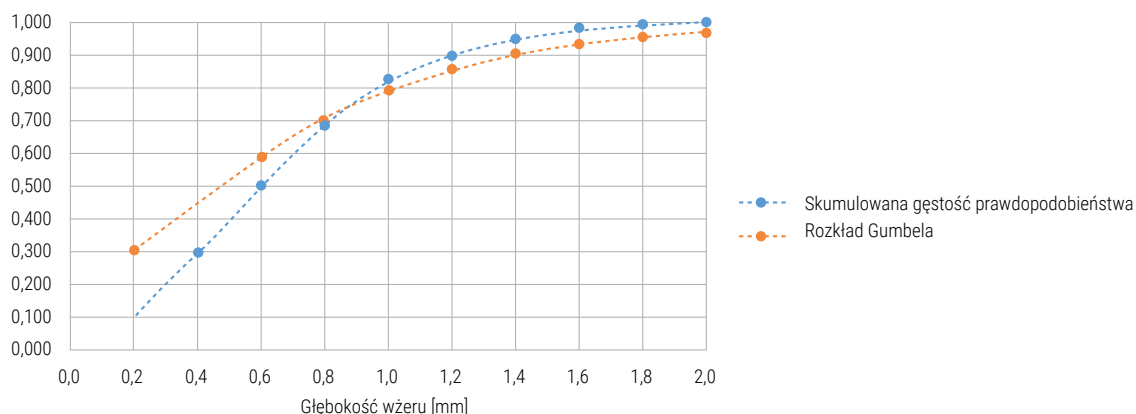


Rys. 5. Rozkład Gumbela

SPRAWDZENIE DOPASOWANIA MODELU TEORETYCZNEGO FUNKCJI GUMBELA Z OBLICZENIOWYM ROZKŁADEM FUNKCJI SKUMULOWANEJ GĘSTOŚCI PRAWDOPODOBIEŃSTWA

Jeżeli istnieje dobre dopasowanie modelu teoretycznego funkcji Gumbela z obliczeniowym rozkładem funkcji skumulowanej gęstości prawdopodobieństwa, model statystyczny uznaje się za prawidłowy, a wyznaczone wartości prawdopodobieństwa za wiarygodne.

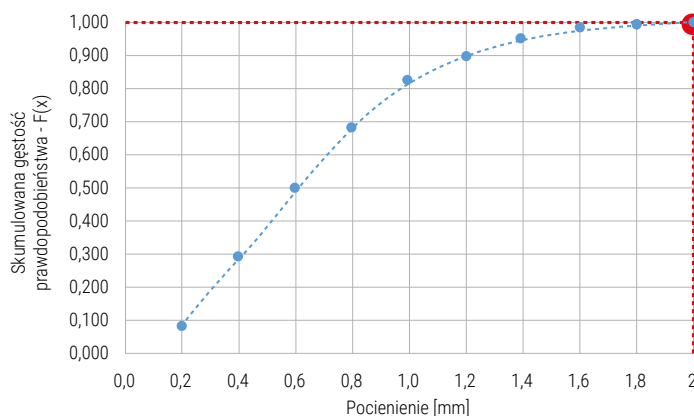
Poniżej podano stopień dopasowania modelu teoretycznego funkcji Gumbela z rozkładem funkcji skumulowanej gęstości prawdopodobieństwa (rys. 6).



Rys. 6. Dopasowanie rozkładu Gumbela i rozkładu skumulowanej gęstości prawdopodobieństwa

WYZNACZENIE PRAWDOPODOBIEŃSTWA WYSTĄPIENIA POCIENIENIA O MAKSYMALNEJ GŁĘBOKOŚCI

Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej określa się prawdopodobieństwo wystąpienia pocienienia o maksymalnej głębokości zgodnie z rozkładem funkcji skumulowanej gęstości prawdopodobieństwa (rys. 7).



Rys. 7. Określenie prawdopodobieństwa wystąpienia maksymalnego pocienienia

W odniesieniu do rozpatrywanego przykładu należy stwierdzić, że prawdopodobieństwo zdarzenia polegającego na wykryciu wżeru o głębokości mniejszej od 2,0 mm wyniesie 99%. Analogicznie prawdopodobieństwo wykrycia maksymalnego wżeru o głębokości większej od 2,0 mm wynosi 1%.

WNIOSKI

Przy pomocy metody statystycznej opartej na teorii Gumbela można skwantyfikować prawdopodobieństwo wystąpienia danej wielkości pocienienia w odniesieniu do całego obiektu badanego. Takie podejście może okazać się bardzo pomocne w zarządzaniu ryzykiem eksploatacyjnym elementów narażonych na korozję wżerową.

Czas wykonania badania jest stosunkowo krótki, gdyż pomiary grubości odnoszą się jedynie do wyznaczonej części obszaru narażenia. W wielu przypadkach, np. dla zbiorników magazynowych, po określeniu obszaru krytycznego (najczęściej w dolnym obszarze pierwszej cagi) nie ma konieczności budowy rusztowań, gdyż pomiar pocienienia przeprowadza się tylko w obrębie tego właśnie obszaru.

Warto podkreślić, że sposób pomiaru głębokości wżerów metodą statystyczną opisuje norma PN-EN ISO 11463:2021, co upowszechniło jej stosowanie w przemyśle, szczególnie w krajach Europy Zachodniej [3].

Literatura:

1. Sokólski W.: Corrosion Processes Direct Assessment as a Part of Operational Pipeline Safety's, VIII National Conference Corrosion Measurements in Electrochemical Protection 16–18. jul 2004 Jurata, Poland.
2. Mackiewicz S.: Statystyczna ocena uszkodzeń korozyjnych na podstawie badań ultradźwiękowych. XIV Seminarium „Nieniszczące badania materiałów”, 2008.
3. Recommended Practice. Det Norske Veritas DNV-RP-G103, Non-intrusive Inspection, 2011.
4. Gumbel E.J.: Statistics of Extremes. Columbia University Press, 1958.

BADANIE METODĄ EMISJI AKUSTYCZNEJ HYDROAKUMULATORÓW W SIŁOWNIACH WIATROWYCH



DR INŻ. TOMASZ DUNAJ

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



CLDT

BADANIA METODĄ EMISJI AKUSTYCZNEJ PROWADZONE SĄ W CELU WYKRYCIA I LOKALIZACJI ORAZ KLASYFIKACJI ŹRÓDEŁ SYGNAŁÓW EMISJI AKUSTYCZNEJ GENEROWANYCH PRZEZ POWIERZCHNIOWE I WEWNĘTRZNE NIECIĄGŁOŚCI W KONSTRUKCJI URZĄDZEŃ TECHNICZNYCH. MOŻLIWOŚĆ WYKONYWANIA BADAŃ W TRAKCIE EKSPLOATACJI URZĄDZEŃ SPRAWIA, ŻE OBECNIE METODA TA JEST UZNAWANA ZA ODPOWIEDNIĄ DO BADAŃ OKRESOWYCH DUŻYCH URZĄDZEŃ TECHNICZNYCH. EMISJA AKUSTYCZNA BARDZO DOBRZE UZUPEŁNIA SIĘ Z INNYMI METODAMI BADAŃ NIENISZCZĄCYCH, CO POZWALA NA WERYFIKACJĘ I DOKŁADNIEJSZĄ OCENĘ WYKRYWANYCH USZKODZEŃ.

Badania metodą emisji akustycznej dla siłowni wiatrowych rozpoczęto w UDT w roku 2018. Badania stałych zbiorników ciśnieniowych na siłowniach wiatrowych realizowane przez Urząd Dozoru Technicznego w ciągu ostatnich 5 lat prowadzone były na sukcesywnie rosnącej liczbie elektrowni wiatrowych. Z każdym rokiem przybywa tych źródeł alternatywnej energii.

Opracowano możliwość wykonywania badań jednocześnie na wszystkich hydroakumulatorach zamontowanych w siłowni wiatrowej. Obecnie w pełni możliwe jest wykonanie przez Urząd Dozoru Technicznego badań zastępczych na hydroakumulatorach metodą emisji akustycznej. Warunkiem niezbędnym jest konieczność złożenia przez eksploatującego do właściwego oddziału terenowego UDT stosownych dokumentów w celu uzyskania zgody na zastąpienie badań oraz przeprowadzenie badań testowych podczas wizji lokalnej. Wynikają one z szerokiej gamy rozwiązań stosowanych przez producentów turbin wiatrowych oraz konieczności przygotowania przez użytkownika obiektów do badań.

W przypadku badań metodą AE (ang. Acoustic Emission AE lub Acoustic Emission Testing AT) typowych urządzeń ciśnieniowych lub płaszczy zbiorników magazynowych fala AE propaguje od źródła bezpośrednio w materiale (metal) i przetwarzana jest na sygnał AE przez czujniki rozmieszczone na powierzchni ścianki badanego urządzenia. Na stopnie sygnał AE rejestrowany i przetwarzany jest przez system pomiarowy AE. W tym przypadku emisja akustyczna w postaci fal sprężystych generowana jest przez powierzchniowe i wewnętrzne nieciągłości w materiale ścianki, spoinach i elementach badanego urządzenia, podlegających działaniu bodźca w postaci obciążenia (np. ciśnienia) w trakcie badania, co jest wynikiem wyzwolenia energii w materiale.



Rys. 1. Hydroakumulator w siłowni wiatrowej

Elektrownia wiatrowa wytwarza energię elektryczną, wykozystując generatory (turbiny wiatrowe) napędzane energią wiatru. Uzyskana w ten sposób energia jest określana jako ekologicznie czysta, gdyż, pomijając nakłady energetyczne wynikające z wybudowania elektrowni, wytworzenie energii nie wymaga spalania żadnego paliwa.



BADANIA ZASTĘPCZE HYDROAKUMULATORÓW WYKONYWANE SĄ JAKO BADANIA LABORATORYJNE UDT PRZEZ CENTRALNE LABORATORIUM DOZORU TECHNICZNEGO (CLDT) W ZAKRESIE POSIADANEJ AKREDYTACJI ZGODNIE Z PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02.

PRZEPISY PRAWNE

Badania techniczne, które należy wykonać w ramach inspekcji hydroakumulatorów, określa rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 17 grudnia 2021 r. w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego dla niektórych urządzeń ciśnieniowych podlegających dozorowi technicznemu (Dz.U. 2022 poz. 68) [1].

Rewizję wewnętrzną zbiornika, tj. ocenę stanu technicznego hydroakumulatora, wykonuje się w na podstawie:

- a) oceny wizualnej stanu hydroakumulatora od strony zewnętrznej,
- b) oceny wizualnej połączeń rozłącznych i nierozłącznych,
- c) oceny wizualnej stanu technicznego osprzętu zabezpieczającego i ciśnieniowego,
- d) badania metodą emisji akustycznej (AT).

Poniżej przedstawiono zapisy rozporządzenia [1].

W odniesieniu do rewizji wewnętrznej hydroakumulatorów utrzymano możliwość zastąpienia oceny wizualnej stanu ścianek hydroakumulatora od strony wewnętrznej innymi badaniami (tab. 1).

Tabela 1. Zapisy rozporządzenia w zakresie rewizji wewnętrznej

Rozdział 2 „Rodzaje, zakres i terminy badań technicznych”
<p>§ 21.1. W toku eksploatacji urządzeń ciśnieniowych przeprowadzane są badania techniczne:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) odbiorcze – w warunkach gotowości do pracy; 2) okresowe – w terminach określonych dla danego rodzaju urządzenia w załączniku nr 1 do rozporządzenia; 3) doraźne – wynikające z bieżących potrzeb, w szczególności eksploatacyjne, powypadkowe, poawaryjne lub wykonywane w ramach nadzoru i kontroli, o których mowa w art. 37 pkt 1 ustawy z dnia 21 grudnia 2000 r. o dozorze technicznym.
<p>§ 21.4. Badania okresowe i doraźne są wykonywane jako:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) rewizje wewnętrzne; 2) próby ciśnieniowe; 3) rewizje zewnętrzne.
<p>§ 22.1. Rewizja wewnętrzna obejmuje ocenę wizualną stanu ścianek urządzenia ciśnieniowego, jego połączeń rozłącznych i nierozłącznych oraz osprzętu zabezpieczającego i osprzętu ciśnieniowego.</p>
<p>§ 22.2. W technicznie uzasadnionych przypadkach, po uzgodnieniu z organem właściwej jednostki dozoru technicznego, ocena wizualna, o której mowa w ust. 1, może być uzupełniona lub zastąpiona innymi badaniami.</p>
<p>§ 30.1. Eksploatujący przygotowuje urządzenia ciśnieniowe do badań technicznych w zakresie umożliwiającym ich przeprowadzenie.</p>
<p>§ 30.4. Eksploatujący przygotowuje urządzenia ciśnieniowe do badań, o których mowa w ust. 1 i 2, w sposób zapewniający bezpieczeństwo osób wykonujących badania oraz zapewnia obsługę techniczną do ich wykonania.</p>

W załączniku nr 1 do ww. rozporządzenia zamieszczono tabelę określającą „Formy dozoru technicznego i maksymalne terminy badań technicznych” (tab. 2).

Tabela 2. Formy dozoru technicznego i maksymalne terminy badań technicznych – hydroakumulatory (zał. 1 rozporządzenia [1])

LP	Rodzaj urządzenia	Forma dozoru		Terminy badań		
		rewizja zewnętrzna		rewizja zewnętrzna	rewizja wewnętrzna	próba ciśnieniowa
1	2	3	4	5	6	7
67.	Hydroakumulatory	bezprzeponowe	pełny	2 lata	6 lat	-
68.		przeponowe	pełny	2 lata	10 lat	-

Rozporządzenie [1] określa możliwość uzgodnienia z UDT wykonania badań zastępczych. Aby przeprowadzić zastępowanie badań w zakresie urządzeń technicznych, należy złożyć dokumentację:

- wniosek zawierający techniczne uzasadnienie zgodne z § 22 ust. 2,
- kartę identyfikacji* czynników degradacji, która zapewnia syntetyczne zestawienie informacji, umożliwiając w efekcie dobór zastępczych metod badań (wzór karty został opracowany przez UDT).

*Kartę identyfikacji, wypełnioną dla pojedynczego urządzenia, należy załączyć do wniosku, natomiast dla urządzeń, które są zgrupowane i nie różnią się informacjami zawartymi w karcie (poza numerem fabrycznym), można wypełnić jedną zbiorczą kartę.

Na podstawie nadesłanego uzasadnionego wniosku wraz z załącznikami, pozytywnie przeanalizowanego, możliwe jest wydać zgodę na wykonanie badań zastępczych. Można wówczas wizualną ocenę stanu ścianek od strony wewnętrznej hydroakumulatora zastąpić badaniem metodą emisji akustycznej, jeżeli analiza przedłożonej dokumentacji nie wykazała inaczej.

WYMAGANIA NORMATYWNE DLA BADAŃ

Zgoda na badania zastępcze hydroakumulatorów metodą emisji akustycznej zawiera informacje na temat wymaganych norm badawczych.

Najważniejsze dokumenty normatywne dotyczące metody badawczej AE dla hydroakumulatorów

PN-EN 13554:2011 - Badania nieniszczące. Emisja akustyczna. Zasady ogólne [2],

PN-EN 14584:2013-07 - Badania nieniszczące. Badania emisją akustyczną. Sprawdzenie metalowych urządzeń ciśnieniowych podczas próby odbiorczej. Planarna lokalizacja źródeł AE [3],

PN-EN ISO 16148:2016-08 - Butle do gazów. Bezszwowe stalowe butle i zbiorniki rurowe do gazów wielokrotnego napełniania. Badania metodą emisji akustycznej (AT) i uzupełniające badania ultradźwiękowe (UT) w kontroli i badaniach okresowych [4],

ASME BPVC.V-2021 „Article 12 - Acoustic emission examination of metallic vessels during pressure testing” [5].

Ujednoczenie stosowanej terminologii

- PN-EN 1330-9: 2017-09 - Badania nieniszczące. Terminologia. Część 9: Terminy stosowane w badaniach emisją akustyczną [6]

Wymagania dotyczące wyposażenia pomiarowo-badawczego

- PN-EN 13477-1:2002 - Badania nieniszczące. Emisja akustyczna. Charakteryzowanie aparatury. Część 1: Opis aparatury [7]
- PN-EN 13477-2:2022-03 - Badania nieniszczące. Badania emisją akustyczną. Charakteryzowanie aparatury. Część 2: Weryfikacja działania [8]

Kwalifikacje, jakie powinien posiadać personel wykonujący badania

- PN-EN ISO 9712:2022-09 - Badania nieniszczące. Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących [9]

METODYKA BADAŃ AE DLA HYDROAKUMULATORÓW

Normy określają wymagania dotyczące obciążania badanych urządzeń poprzez podnoszenie ciśnienia oraz kryteria akceptacji wyników badań metodą emisji akustycznej

Ustalając występujące w danym urządzeniu mechanizmy degradacji oraz miejsca ich rzeczywistego i potencjalnego występowania, należy wziąć pod uwagę istnienie zjawisk oraz ich wpływ na urządzenie, np. obciążenia cykliczne i wibracje lub uderzenia hydrauliczne, i ustalić wpływ destrukcyjny na materiał. Uderzenie hydrauliczne powoduje gwałtowny wzrost naprężeń i przyczynia się do zmęczenia materiału.

Zgodnie z klasyfikacją aktywności źródeł emisji akustycznej przedstawionych w tabeli 2 wynik badania uznaje się za:

- POZYTYWNY, jeżeli dla danego hydroakumulatora nie zlokalizowano żadnych źródeł AE lub zlokalizowano źródła AE spełniające tylko kryteria źródeł mało istotnego klasy 1,
- NEGATYWNY, jeżeli dla danego hydroakumulatora zlokalizowano źródła AE spełniające kryteria co najmniej źródła aktywnego klasy 2 (uzupełnia się badania metodą emisji akustycznej innymi badaniami nieniszczącymi), a w przypadku wykrycia i lokalizacji bardzo aktywnych źródeł AE klasy 3 wstrzymuje się eksploatację urządzenia technicznego.

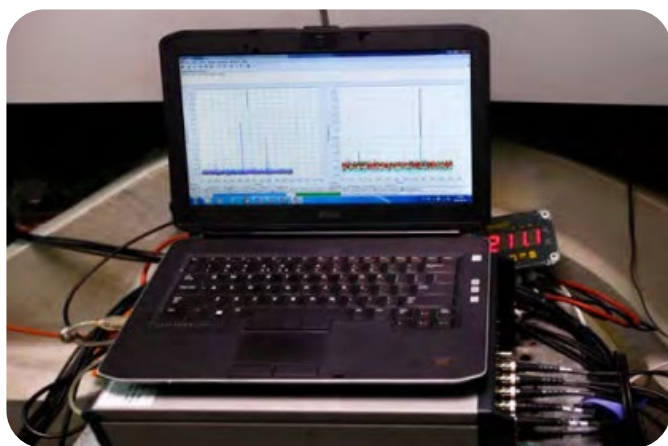
Podczas badania urządzenia stosuje się jednoczesne obciążanie wszystkich hydroakumulatorów zlokalizowanych na siłowni wiatrowej z wykorzystaniem układu hydraulicznego. Schemat podnoszenia ciśnienia w trakcie badania metodą emisji akustycznej przedstawiono na wykresie (rys. 1). Przed badaniem eksploatujący, na podstawie analizy warunków pracy urządzeń przygotowanych do badań, określa maksymalne ciśnienie robocze z ostatnich 12 miesięcy pracy hydroakumulatorów. Następnie, korzystając z przedstawionego schematu, uzyskuje się właściwy schemat podnoszenia ciśnienia w trakcie badania metodą AE.

PRZYKŁAD

Maksymalne ciśnienie robocze, które wystąpiło na urządzeniu w ciągu ostatnich 12 miesięcy, miało wartość 200 barów.

Badanie jest przeprowadzane z sukcesywnie podnoszonym ciśnieniem według wykresu (rys. 3).

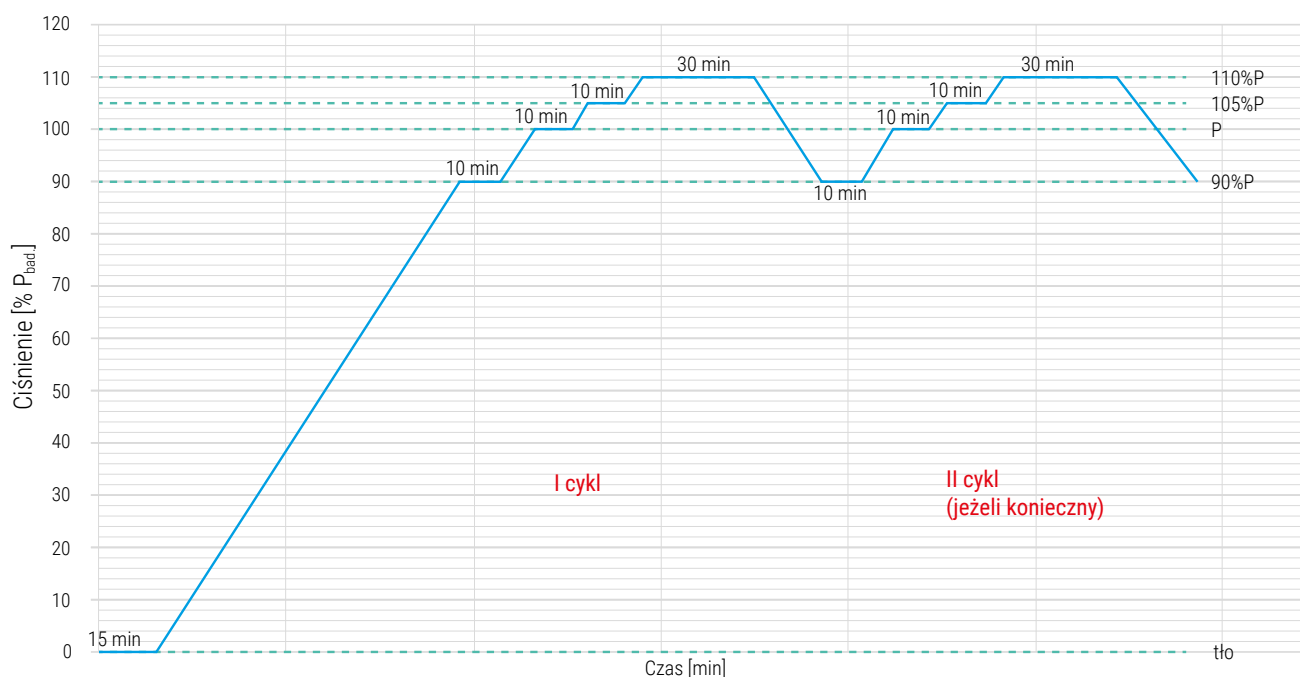
- 0% = 0 bar
- 90% z 200 bar ($P_{\text{max.rob. z 12 mies.}}$) = 180 barów
- 100% z 200 bar ($P_{\text{max.rob. z 12 mies.}}$) = 200 barów
- 105% z 200 bar ($P_{\text{max.rob. z 12 mies.}}$) = 210 barów
- 110% z 200 bar ($P_{\text{max.rob. z 12 mies.}}$) = 220 barów



Rys. 2. Komputerowy zestaw do badania i analizy danych dla metody emisji akustycznej

Tabela 2. Klasyfikacja aktywności źródeł emisji akustycznej

Klasyfikacja aktywności źródeł emisji akustycznej wg PN-EN 13554:2011 i PN-EN 14584:2013-07		
Klasa źródła	Definicja	Zalecane działania
1	Źródło mało istotne	Nie są wymagane dalsze działania. Źródło do uwzględnienia w następnych badaniach.
2	Źródło aktywne	Zaleca się badanie innymi metodami nieniszczącymi, jeżeli źródło AE jest powiązane z charakterystycznymi elementami urządzenia ciśnieniowego (np. spoiny króćców, uchwyty itd.).
3	Źródło bardzo aktywne	Zanim urządzenie ciśnieniowe zostanie włączone do eksploatacji, powinna być przeprowadzona dalsza ocena innymi odpowiednimi metodami badań nieniszczących



Rys. 3. Schemat obciążania obiektu – podnoszenia ciśnienia w trakcie badania metodą emisji akustycznej

OBIEKTY BADANE

Obecnie większość siłowni wiatrowych wyposażona jest w układy hydrauliczne zapewniające między innymi możliwość sterowania pozycją łopat czy aktywacją hamulca. Jednym z elementów takiego układu hydraulicznego jest hydroakumulator, który ma za zadanie gromadzić energię potencjalną ciśnienia oraz kompensować wahania ciśnienia.

W turbinach wiatrowych stosuje się różne rodzaje hydroakumulatorów, które różnią się sposobem rozdzielania czynników roboczych. Najczęściej stosowane są hydroakumulatory pęcherzowe (przeponowe), dużą grupę stanowią też urządzenia tłokowe (bezprzeponowe). Zasadniczo czynnikiem roboczym jest z jednej strony azot, a z drugiej olej hydrauliczny.

W zależności od producenta oraz typu turbiny wiatrowej stosuje się różne rozwiązania w zakresie liczby hydroakumulatorów, ich pojemności oraz parametrów pracy.

Wśród wielu parametrów, którymi różnią się hydroakumulatory, należy wymienić te, które mogą wpłynąć na prowadzenie badania metodą emisji akustycznej, tj.:

- typ i rodzaj hydroakumulatora,
- pojemność,
- materiał,
- nominalna grubość ścianki,
- minimalna grubość ścianki,
- ciśnienie dopuszczalne,
- maksymalne ciśnienie robocze.



Obecnie większą część badanych zbiorników stanowią hydroakumulatory pęcherzowe, które najczęściej występują w jednym z trzech układów (tab. 3 – Nr 1)

HYDROAKUMULATORY PĘCZERZOWE			
LICZBA HYDROAKUMULATORÓW NA WIEŻY WIATROWEJ	4	5	6
POJEMNOŚĆ	3 x 20 l 1 x 57 l	4 x 20 l 1 x 32 l	4 x 20 l lub 24,5 l 1 x 32 l 1 x 3,5 l

Coraz liczniejszą grupę stanowią również hydroakumulatory tłokowe, które występują w kilku różnych układach (tab. 3 – Nr 2) od 5 do 11 szt. na jednej wieży wiatrowej. Często posiadają podwójny układ hydrauliczny pracujący na odmiennych parametrach ciśnienia.

Każdy rok przynosi kolejne, jeszcze niebadane rozwiązania układów hydraulicznych, stosowane w „młodszych” siłowniach wiatrowych. UDT każdorazowo oferuje możliwość wykonania badań testowych w celu dopracowania optymalnego modelu wsparcia serwisowego przy spełnieniu wymagań dokumentów odniesienia.

Tabela 3. Badane zestawy hydroakumulatorów zlokalizowanych na siłowni wiatrowej, przykłady

Nr	Typ hydroakumulatora	Pojemność [l]	Ciśnienie dopuszczalne [bar]	Ciśnienie robocze [bar]	Liczba sztuk
1	Pęcherzowy	0,02	330	200	4
		0,032	330	200	1
		0,0035	250	200	1
2	Tłokowy	0,02	300	245	9
		0,012	300	245	1
		0,006	90	80	1



Pierwsze badanie zastępcze hydroakumulatorów metodą emisji akustycznej zrealizowano w kwietniu 2018 r. Do połowy 2023 r. przebadano metodą emisji akustycznej w ramach badań zastępczych ponad 3500 sztuk hydroakumulatorów zlokalizowanych w ponad 650 siłowniach wiatrowych. Badania UDT metodą AE hydroakumulatorów obejmują różne typy i producentów tych urządzeń.

PROCEDURY I POTENCJAŁ BADAŃ AE

Sprawną realizacją badań zastępczych przez CLDT wsparta jest przez odpowiednie wytyczne i instrukcje UDT. Ujednolicają one podejście dotyczące zarówno procedowania spraw formalnoprawnych, jak i samego badania z wykorzystaniem emisji akustycznej.

W skrócie przebieg postępowania można opisać jak poniżej.

- Eksploatujący występuje z wnioskiem opatrzonym załącznikami do właściwego terenu oddziału/biura UDT.
- Eksploatujący otrzymuje zgodę na badania zastępcze, jeżeli postępowanie nie wykazało braku możliwości wykonania takich badań.
- Wraz ze zgodą przekazane są warunki wykonania badania metodą emisji akustycznej (AE). Według wytycznych UDT do badania zastępczego hydroakumulatorów na siłowniach wiatrowych zalecana jest metoda AE.
- Eksploatujący każdorazowo dla danego urządzenia lub grupy urządzeń zlokalizowanych na danej farmie wiatrowej obowiązany jest wystąpić z wnioskiem o zgodę na badania zastępcze. Rozporządzenie nie przewiduje „automatycznego” zastępowania oceny wizualnej.

Badania realizowane są według ustalonego pomiędzy UDT i eksploatującym lub wskazanym przez niego serwisem harmonogramu badań. Pomimo tego, że UDT posiada wiele systemów do badań AE oraz ponad trzydziestoosobowy personel badawczy o kwalifikacjach potwierdzonych odpowiednimi certyfikatami, zaleca się rozpoczęcie procedury badań zastępczych co najmniej trzy miesiące przed upływem terminu decyzji dopuszczającej urządzenia do eksploatacji. UDT wypracował system angażujący wiele osób na różnych etapach, który pozwala po badaniu wykonać część czynności przez osoby bezpośrednio nie uczestniczące w badaniu i uzyskać protokół z badań metodą emisji akustycznej w dniu badania. W przypadku pozytywnego wyniku badań umożliwia to wystawienie decyzji dopuszczającej do eksploatacji, bez konieczności przeprowadzenia oddzielnie badania AE i oddzielnie czynności inspekcyjnych.

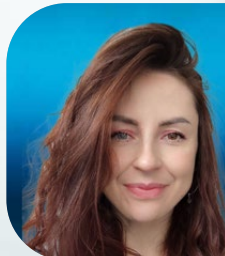
W składzie zespołu wykonującego czynności na turbinie wiatrowej znajduje się co najmniej jedna osoba posiadająca odpowiednie kwalifikacje, aby wykonać ważne formalnie badanie metodą emisji akustycznej, oraz co najmniej jedna osoba posiadająca odpowiednie szkolenie i upoważnienie, aby przeprowadzić czynności inspekcyjne i wydać ważną decyzję administracyjną. W skład zespołu wchodzi też osoby pracujące zdalnie, które mają odpowiednie kwalifikacje do oceny i autoryzacji wyników. Protokół badania metodą emisji akustycznej wystawiany jest zgodnie z zasadami określonymi w certyfikacie akredytacji wydanym przez PCA dla laboratorium badawczego.



Literatura

1. Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii z 17.12.2021 r. w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego dla niektórych urządzeń ciśnieniowych podlegających dozorowi technicznemu (Dz.U. z 2022 poz. 68), <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20220000068/O/D20220068.pdf>
2. PN-EN 13554:2011 - Badania nieniszczące. Emisja akustyczna. Zasady ogólne
3. PN-EN 14584:2013-07 - Badania nieniszczące. Badania emisją akustyczną. Sprawdzenie metalowych urządzeń ciśnieniowych podczas próby odbiorczej. Planarna lokalizacja źródeł AE
4. PN-EN ISO 16148:2016-08 - Butle do gazów. Bezszywowe stalowe butle i zbiorniki rurowe do gazów wielokrotnego napełniania. Badania metodą emisji akustycznej (AT) i uzupełniające badania ultradźwiękowe (UT) w kontroli i badaniach okresowych
5. ASME BPVC.V-2021 „Article 12 - Acoustic emission examination of metallic vessels during pressure testing”
6. PN-EN 1330-9: 2017-09 - Badania nieniszczące. Terminologia. Część 9: Terminy stosowane w badaniach emisją akustyczną
7. PN-EN 13477-1:2002 - Badania nieniszczące. Emisja akustyczna. Charakteryzowanie aparatury. Część 1: Opis aparatury
8. PN-EN 13477-2:2022-03 - Badania nieniszczące. Badania emisją akustyczną. Charakteryzowanie aparatury. Część 2: Weryfikacja działania
9. PN-EN ISO 9712:2022-09 - Badania nieniszczące. Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących

ZASTOSOWANIE SKANINGOWEJ MIKROSKOPII ELEKTRONOWEJ W BADANIACH MATERIAŁÓW INŻYNIERSKICH



MGR INŻ. MAGDALENA JAKUBOWSKA

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



CLDT

Skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM) jest niezwykle wszechstronną techniką, która znajduje szerokie zastosowanie w badaniach instalacji i urządzeń technicznych w wielu gałęziach przemysłu. Umożliwia szczegółowe zobrazowanie i analizę mikrostruktury materiałów, topografii powierzchni przelomów lub mikrodefektów w i nieciągłości na poziomie mikro- i nanometrycznym. Dzięki tym ocenom możliwe jest określenie przyczyn awarii i uszkodzeń w przemyśle metalurgicznym, elektronicznym, chemicznym, rafineryjnym, motoryzacyjnym lub lotniczym. Obrazowanie w wysokiej rozdzielczości przydatne jest do oceny różnych materiałów pod kątem pęknięć powierzchniowych, wad, zanieczyszczeń lub procesów korozji. Jest to kluczowe dla oceny stanu i trwałości materiałów używanych w instalacjach przemysłowych. Wyniki badań SEM pomagają m.in. w planowaniu konserwacji, wymiany, remontów i prac serwisowych.

Jednym z kluczowych elementów SEM jest detektor EDS umożliwia analizę składu chemicznego próbek. Wykrywa charakterystyczne promieniowanie rentgenowskie emitowane przez próbkę, co pozwala na identyfikację jego obecności w badanym materiale. Dzięki EDS można tworzyć mapy rozkładu pierwiastków na powierzchni próbki. Detektor EDS jest często używany w badaniach korozji materiałów i pozwala na identyfikację i analizę chemiczną produktów korozji.

W mikroskopii świetlnej maksymalne użyteczne powiększenie wynosi około 1000x. Aby osiągnąć wyższą rozdzielczość, a tym samym większe powiększenie, konieczne jest zastosowanie promieniowania o krótszej długości fali. W mikroskopii elektronowej elektrony są zazwyczaj przyspieszane do energii w zakresie od 2 do 1000 keV, co odpowiada długości fal od 0,027 do 0,0009 nm.

W mikroskopie wykorzystującym do obrazowania strumień elektronów zachodzi wiele różnorodnych interakcji pomiędzy wysokoenergetyczną wiązką elektronów a atomami w próbce. W przypadku bardzo cienkich próbek elektrony mogą przenikać przez materiał bez absorpcji, umożliwiając tworzenie obrazu w transmisyjnej mikroskopii elektronowej (TEM - *ang. Transmission Electron Microscope*). W przypadku grub-

szych próbek elektrony nie są w stanie przeniknąć przez materiał, a informacje o strukturze próbki dostarczają jedynie cząstki emitowane z powierzchni, takie jak elektrony, fotony (w tym promieniowanie rentgenowskie), czy inne formy promieniowania. To właśnie te sygnały są wykorzystywane w konwencjonalnej skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM - *ang. Scanning Electron Microscope*)

DLACZEGO SKANINGOWA MIKROSKOPIA ELEKTRONOWA?

Skaningowa mikroskopia elektronowa umożliwia uzyskanie szczegółowych informacji na temat topografii powierzchni, struktury krystalicznej, składu chemicznego oraz właściwości elektrycznych wierzchniej warstwy próbki o grubości około 1 μm . SEM można wyposażać w różne specjalistyczne akcesoria, które pozwalają na badania próbek w różnych warunkach, na przykład w ekstremalnie wysokich lub niskich temperaturach, a także podczas testów mechanicznych *in situ*. Przykładowo katodoluminescencja, czyli emisja światła, jest znacznie intensywniejsza w temperaturach bliskich zeru absolutnemu niż w temperaturze pokojowej, co sprawia, że obrazy uzyskane z próbek schłodzonych charakteryzują się mniejszym poziomem szumów.

Zalety SEM w porównaniu do mikroskopii świetlnej	Zalety SEM w porównaniu do transmisyjnej mikroskopii elektronowej TEM
<ul style="list-style-type: none"> SEM oferuje dużą głębię ostrości, co umożliwia jednoczesne wyostrzenie większości powierzchni próbki, niezależnie od jej chropowatości. W przypadku mikroskopów świetlnych, działających przy wysokim powiększeniu, głębia ostrości jest bardzo mała, co sprawia, że jakość obrazu silnie zależy od gładkości powierzchni. SEM pozwala na uzyskanie znacznie wyższych powiększeń, sięgających nawet 1 000 000x, przy ostatecznej rozdzielczości wynoszącej 1 nm. Dla porównania maksymalne użyteczne powiększenie w mikroskopie świetlnym wynosi około 1000x. SEM umożliwia uzyskanie bardziej szczegółowych informacji niż tylko topografia powierzchni, takich jak struktura krystaliczna, skład chemiczny czy właściwości elektryczne. Przełączanie się między różnymi technikami obrazowania pozwala na precyzyjną korelację uzyskanych danych. 	<ul style="list-style-type: none"> SEM umożliwia badanie większych próbek, o średnicy do 200 mm, a nawet większych, w specjalnie przystosowanych mikroskopach w porównaniu do TEM, gdzie średnica próbki zazwyczaj wynosi 2–3 mm. SEM pozwala na niedestrukcyjne badanie próbek, podczas gdy TEM jest w zasadzie techniką destrukcyjną ze względu na konieczność przygotowania bardzo cienkich folii próbki. SEM charakteryzuje się bardzo krótkim czasem przygotowania próbki, często wynoszącym zaledwie kilka sekund, podczas gdy przygotowanie próbki do TEM jest bardziej skomplikowane i czasochłonne.

PRZYGOTOWANIE PRÓBKII

Materiały przewodzące, takie jak metale, nie wymagają skomplikowanych procedur przygotowawczych do badań SEM. W większości przypadków wystarczy odpowiednie oczyszczenie powierzchni próbki, aby usunąć zanieczyszczenia, takie jak oleje czy pył. Następnie próbka jest montowana na uchwycie mikroskopu za pomocą przewodzącego kleju lub taśmy, co zapewnia dobry kontakt elektryczny. Pozwala to na skuteczne odprowadzanie ładunków elektrycznych generowanych przez wiązkę elektronową, co eliminuje problem naładowania próbki, które mogłyby wpłynąć na jakość obrazu.

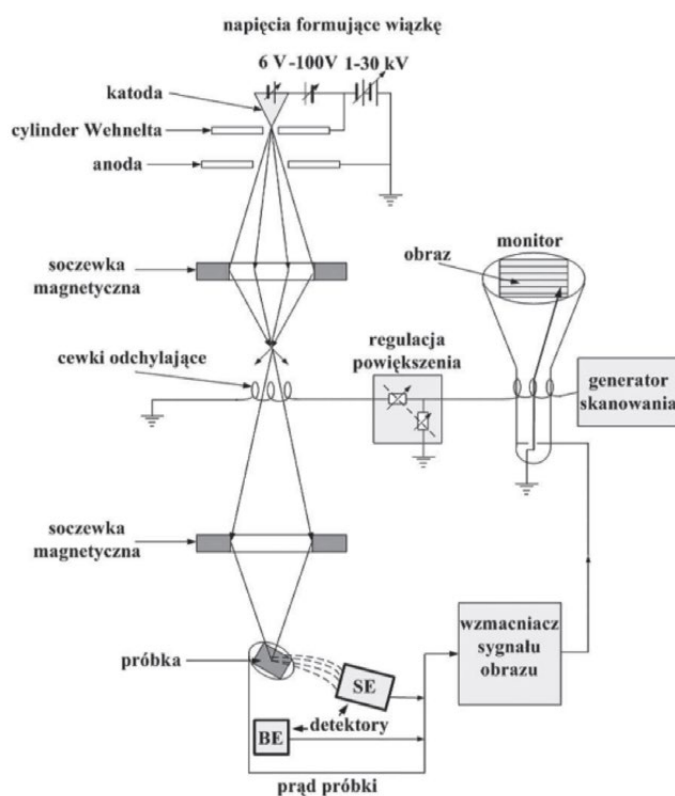
Materiały nieprzewodzące, takie jak ceramika, szkło czy niektóre tworzywa sztuczne, wymagają dodatkowych kroków przygotowawczych, aby zapobiec gromadzeniu się ładunków elektrycznych na powierzchni próbki. Naładowanie próbki może prowadzić do zakłóceń obrazu. W celu

uniknięcia tych problemów próbki nieprzewodzące są zazwyczaj pokrywane cienką warstwą przewodzącego materiału, takiego jak złoto, platyna czy węgiel, za pomocą napyłania próżniowego (ang. *sputtering*) lub parowania próżniowego (ang. *evaporation*). Alternatywnie można stosować specjalne tryby pracy SEM, takie jak niska próżnia LVSEM (ang. *Low Vacuum Scanning Electron Microscopy*) lub SEM z ciśnieniem zmiennym VPSEM (ang. *Variable Pressure Scanning Electron Microscopy*), które umożliwiają obrazowanie próbek bez konieczności ich metalizacji.

ZASADA DZIAŁANIA

Skaningowa mikroskopia elektronowa jest skuteczną techniką do obrazowania mikrostruktur powierzchniowych [1]. Proces ten polega na skanowaniu powierzchni próbki wiązką elektronów o nanometrowych rozmiarach, która jest formowana przez układ elektrono-optyczny mikroskopu. Wiązka ta jest kształtowana za pomocą soczewek elektrono-owych, zazwyczaj magnetycznych (rys. 1).

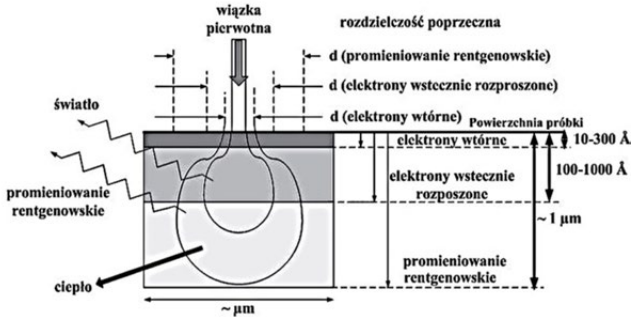
Do odchylenia wiązki wykorzystuje się cewki. Sygnał z powierzchni próbki, zazwyczaj w postaci elektronów wtórnych lub odbitych, jest przekazywany do detektora, który składa się przede wszystkim ze scyntyлятора i fotopowielacza. Scyntylator przekształca energię elektronów wtórnych na impulsy świetlne, które następnie są wzmacniane przez fotopowielacz. Sygnał z detektora kontroluje jasność obrazu wyświetlanego na monitorze [2].



Rys. 1. Schemat budowy skaningowego mikroskopu elektronowego [2]

Interakcja wiązki elektronów z próbką prowadzi do emisji m.in. elektronów wtórnych (ang. *Secondary Electron*), wstecznie rozproszonych (ang. *BackScattered Electron*), elektronów Augera oraz promieniowania rentgenowskiego, które są zbierane przez różne detektory w komorze mikroskopu SEM.

Sygnal z każdego detektora może być przekazywany na monitor, który jest rasterowany synchronicznie z wiązką elektronów. Powiększenie obrazu zależy od stosunku długości boku wyświetlacza monitora do długości boku rastrowanego obszaru próbki. Najlepsza rozdzielczość obrazów elektronów wtórnych osiągnięta w FEG SEM (ang. Field Emission Gun) wynosi około 1 nm, ale zazwyczaj wartość ta wynosi około 5 nm dla źródeł wykonanych z sześcioberek lantanu (LaB_6) i wolframu (W).

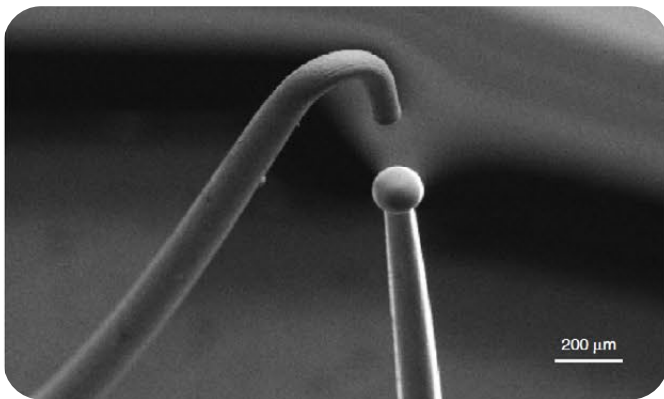


Rys. 2. Schematyczny rysunek oddziaływania elektronów z materią w grubej próbce (próbka objętościowa) [1, 2]

W mikroskopach skaningowych elektronowych elektrony emitowane z działa elektronowego zazwyczaj mają energię w zakresie od 2 do 40 keV. W zależności od zastosowania i wymagań stosuje się trzy główne typy dział elektronowych, które opisano w dalszej części artykułu.

WŁÓKNA WOLFRAMOWE

Najczęściej wykorzystywane są włókna wolframowe, które mają kształt szpilki. Poprzez przepływ prądu są one podgrzewane do temperatury powyżej 2500°C, co wywołuje termoemisję elektronów z ich końcówki. Jest to rozwiązanie popularne ze względu na prostotę i efektywność, jednak nadmierne podgrzewanie może prowadzić do uszkodzenia filamentu, czego przykładem jest widoczny na rysunku stopiony koniec przegrzanego włókna wolframowego (rys. 3).



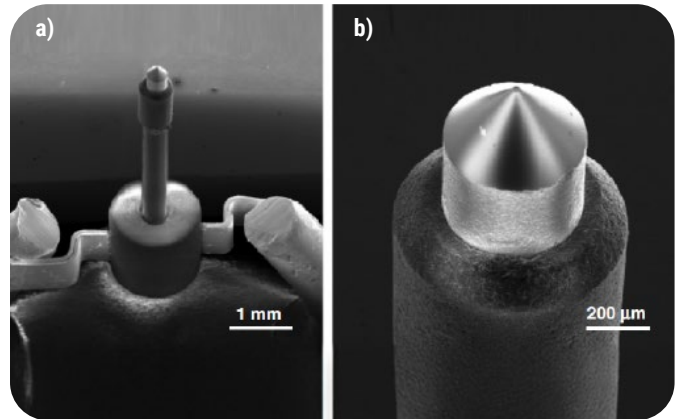
Rys. 3. Obraz SEM włókna wolframowego „przeżalonego” wskutek przegrzania. Widoczny jest kulisty stopiony koniec w miejscu przerwania włókna [3]

DZIAŁA Z SZEŚCIOBORKU LANTANU (LaB_6)

Działają również na zasadzie termoemisji, ale mają kilka istotnych zalet w porównaniu do włókien wolframowych. Przede wszystkim zapewniają wyższy maksymalny prąd wiązki, co skutkuje jaśniejszą wiązką, ponieważ LaB_6 ma niższą pracę wyjścia niż wolfram. Dodatkowo filamenty LaB_6 charakteryzują się dłuższym czasem pracy. Jednakże ich wyższa efektywność wiąże się również z wyższą ceną, co sprawia, że są stosowane głównie w bardziej zaawansowanych aplikacjach (rys. 4).

DZIAŁA Z EMISJĄ POLOWĄ (FEG)

Znane również jako emiter „zimnej katody”, działa te nie wymagają podgrzewania. Zamiast tego wykorzystują bardzo wysokie pole elektryczne do drobno zakończonych końcówki, co prowadzi do tunelowania elektronów na zasadzie mechaniki kwantowej. Dział FEG zapewniają najjaśniejszą wiązkę z minimalnymi odchyleniami energii elektronów, co czyni je idealnym rozwiązaniem do obrazowania o bardzo wysokiej rozdzielczości. Wymagają jednak utrzymania ekstremalnie wysokiej próżni (około 10^{-10} Torr) w pobliżu działa, co zwiększa ich koszt i złożoność obsługi w porównaniu do standardowych dział termoemisyjnych, które działają w próżni na poziomie 10^{-6} Torr.



Rys. 4. (a) Obraz SEM działa elektronowego LaB_6 oraz (b) obraz o większym powiększeniu, na którym łatwo rozpoznać małe plamy zanieczyszczeń [3]

ODDZIAŁYWANIE WIĄZKI ELEKTRONÓW Z PRÓBKĄ

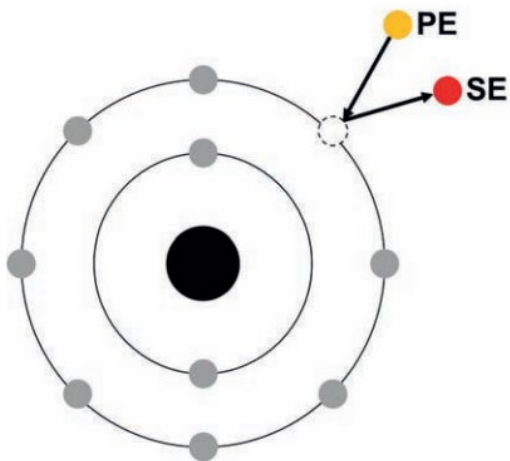
W skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) dostępnych jest wiele sygnałów, które można wykorzystać do analizy próbek. W przypadku gdy, energia elektronów w wiązce jest tracona podczas oddziaływań z elektronami atomów próbki, prowadzi to do rozpraszania nieelastycznego, charakterystycznego dla elektronów wtórnych. Natomiast w przypadku braku zmiany energii, elektrony pierwotne zmieniają kierunek lotu w wyniku oddziaływania z jądrami atomowymi, co nazywamy rozpraszaniem elastycznym (otrzymujemy wtedy sygnał elektronów wstecznie rozproszonych BSE).

Intensywność rozpraszania nieelastycznego zależy od składu chemicznego, gęstości i grubości próbki. Wraz ze wzrostem gęstości oraz grubości próbki intensywność rozpraszania wzrasta, niezależnie od tego, czy próbka jest krystaliczna, czy amorficzna. Obszar, w którym 95% elektronów ulega rozproszeniu, nazywany jest strefą oddziaływania. Głębokość oraz powierzchniowe rozmycie strefy wnikania w próbce są niemalże proporcjonalne do kwadratu napięcia przyspieszającego (U^2) oraz do jego potęgi $-3/2$ ($U^{-3/2}$). Materiały o wyższej liczbie atomowej charakteryzują się mniejszą głębokością wnikania elektronów oraz większym rozmyciem powierzchniowym obszaru wnikania w porównaniu z materiałami o niższej liczbie atomowej.

Detekcja sygnałów SE (elektronów wtórnych) oraz BSE (elektronów wstecznie rozproszonych) jest kluczowa dla obrazowania badanej powierzchni, struktury oraz jej morfologii. Dodatkowo charakterystyczne promieniowanie rentgenowskie umożliwia uzyskanie informacji na temat ilościowego i jakościowego składu chemicznego analizowanego mikroobszaru. Sygnał BSE może także ujawniać strukturę krystalograficzną oraz kompozycję fazową badanej próbki.

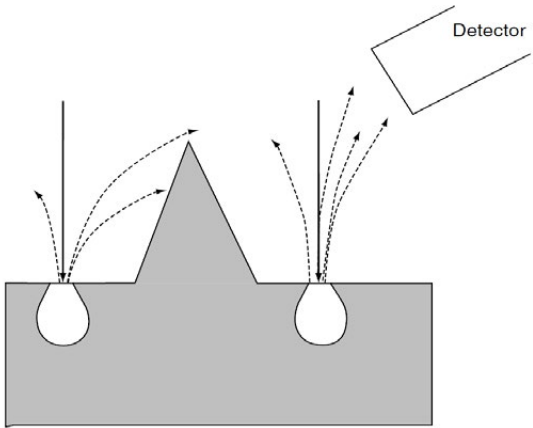
1. Obrazy elektronów wtórnych (SE)

Elektrony wtórne są cząstkami, które opuszczają próbkę z energią poniżej 50 eV, zazwyczaj w wyniku wybicia ich z orbit wokół jądra atomowego przez padający elektron wiązki elektronowej (rys. 5). Obrazy generowane przez elektrony wtórne charakteryzują się najwyższą rozdzielczością przestrzenną, ponieważ elektrony te mogą uciec jedynie z bardzo płytkiej, powierzchniowej warstwy materiału, co sprawia, że sygnał pochodzi z obszaru zbliżonego wielkością do sondy elektronowej. Obrazy SE dostarczają przede wszystkim informacji o topografii powierzchni. Dodatkowo, ponieważ część elektronów wstecznie rozproszonych jest również zbierana przez detektor elektronów wtórnych, obrazy SE mogą wykazywać pewien kontrast kompozycyjny, który zależy od napięcia przyspieszającego.



Rys. 5. Schemat powstawania elektronów wtórnych [4]

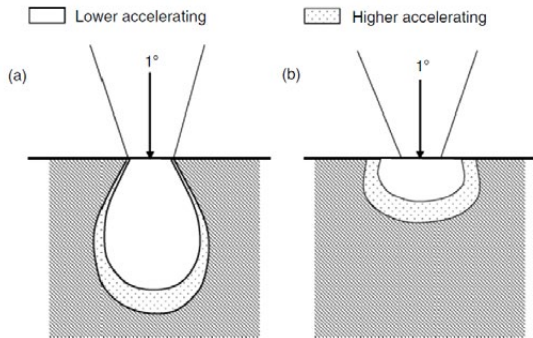
Na rysunku 6 przedstawiono, w jaki sposób kształt powierzchni próbki i pozycja detektora wpływają na liczbę elektronów wtórnych rejestrowanych przez detektor. Wypukłe obszary oraz miejsca o bardziej stromym nachyleniu emitują więcej elektronów, które bez przeszkód docierają do detektora, co przekłada się na jaśniejszy obraz. Z kolei wklęsłe fragmenty lub częściowo zasłonięte elementy topografii mogą powodować, że mniej elektronów zostanie zarejestrowanych, co skutkuje powstaniem ciemniejszych obszarów na obrazie SEM.



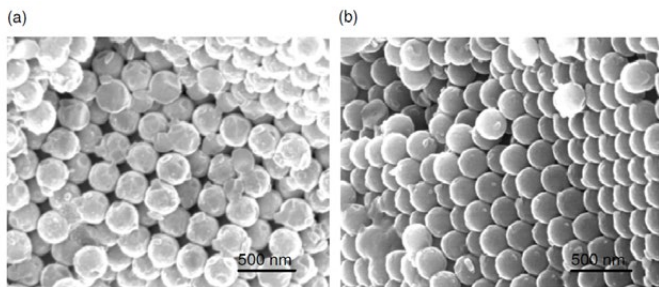
Rys. 6. Wpływ topografii powierzchni oraz położenia detektora na detekcję elektronów wtórnych [3]

Wpływ napięcia przyspieszającego oraz liczby atomowej materiału próbki na objętość pierwotnego wzbudzenia, czyli na strefę interakcji elektronów pierwotnych z próbką pokazano na rysunku 7. Przy wyższym napięciu przyspieszającym (rys. 7a) wzrasta energia elektronów wiązki padającej, co prowadzi do zwiększenia objętości i głębokości strefy wzbudzenia,

z której emitowane są sygnały. W przypadku materiałów o wyższej liczbie atomowej (rys. 7b), mimo wyższego napięcia przyspieszającego, strefa wzbudzenia jest mniejsza, ponieważ atomy o wyższej liczbie atomowej silniej oddziałują z elektronami. Wyższe napięcie przyspieszające prowadzi również do mniejszej długości fali elektronów, co skutkuje lepszą rozdzielczością i mniejszym rozmyciem sygnału SE (rys. 8).



Rys. 7. Wpływ napięcia przyspieszającego oraz liczby atomowej próbki na objętość pierwotnego wzbudzenia: (a) niska liczba atomowa i (b) wysoka liczba atomowa [3]

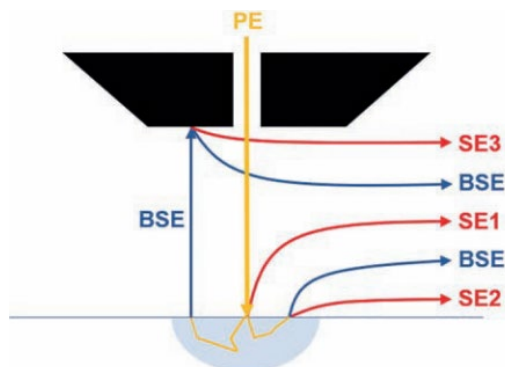


Rys. 8. Obrazy SEM struktury opalowej CaF2 o zwartej budowie, wykonane przy różnych napięciach przyspieszających: (a) 1 kV i (b) 20 kV [3]

W mikroskopii skaningowej elektronowej do detekcji elektronów wtórnych stosuje się głównie dwa typy detektorów: Everharta-Thornleya (E-T) oraz detektor wewnątrzsoczewkowy (In-lens SE2), który w zależności od producenta może mieć różne nazwy. Detektor E-T jest umieszczony w pobliżu próbki, pod pewnym kątem w komorze mikroskopu, natomiast detektor In-lens znajduje się nad próbką w kolumnie mikroskopu. Obecnie detektory typu E-T lub SE2 są najczęściej wykorzystywane do rejestracji sygnałów SE i BSE, co wynika z ich umiejscowienia i możliwości wychwytywania elektronów wtórnych (rys. 9).

Detektor Everharta-Thornleya charakteryzuje się dużą zdolnością wzmacniania sygnału przy minimalnym poziomie szumów. Elektrony wtórne, wzbudzone z powierzchni próbki, kierowane są w stronę scyntylatora za pomocą napięcia przyłożonego do kolektora. Tam przyspieszane są przez potencjał samego scyntylatora, a następnie, po uderzeniu w scyntylator, generują fotony. Te fotony są przesyłane do fotopowielacza, który zamienia je na sygnał elektryczny, proporcjonalny do energii pierwotnej niesionej przez sygnał SE z próbki. Kolektor detektora może być zasilany napięciem w zakresie od -250 V do +400 V, co pozwala na filtrowanie sygnałów docierających do detektora. Dla detekcji sygnałów SE potencjał ten zazwyczaj wynosi powyżej +250 V, natomiast dla detekcji wyłącznie elektronów BSE stosuje się napięcie w okolicach -50 V. W większości standardowych zastosowań kolektor ustawiany jest na wartość domyślną około +300 V.

Detektor In-lens z kolei znajduje się wewnątrz obiektywu mikroskopu, bezpośrednio na ścieżce wiązki elektronów pierwotnych, gdzie również odbywa się detekcja elektronów wtórnych. Detektor ten jest szczególnie wrażliwy na sygnały powstające bezpośrednio w miejscu interakcji wiązki pierwotnej PE z materiałem, co czyni go idealnym do rejestrowania sygnałów typu SE1 i SE2 (rys. 9).



Rys. 9. Schemat pochodzenia poszczególnych rodzajów elektronów wtórnych [4]

Usytuowanie detektora In-lens umożliwia efektywne zbieranie elektronów wtórnych i przyczynia się do poprawy jakości obrazu, zwłaszcza przy niskim napięciu przyspieszającym. Przy niskim napięciu przyspieszającym elektrony osiągają mniejszą prędkość, co może prowadzić do ich rozpraszania w próbce. Usytuowanie detektora blisko próbki (wewnątrz kolumny mikroskopu) zmniejsza wpływ rozpraszania, poprawiając rozdzielczość i kontrast obrazów.

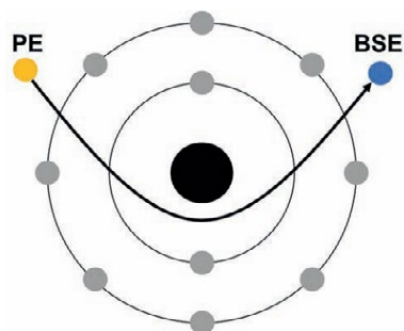
Skuteczność tego detektora zależy w dużej mierze od odległości roboczej, która powinna być optymalnie dostosowana do geometrii próbki i używanego napięcia przyspieszającego, a także nie przekraczać 10 mm. Największą zaletą detektora In-lens jest jego wysoka czułość na sygnały SE przy niskim napięciu przyspieszającym. Ważnym czynnikiem wpływającym na jakość detekcji jest również kąt nachylenia próbki.

Wybór odpowiedniego detektora zależy przede wszystkim od charakterystyki próbki oraz warunków badania. W przypadku materiałów wrażliwych na działanie wiązki elektronowej, takich jak polimery czy preparaty biologiczne, detektor In-lens, stosowany przy niskim napięciu przyspieszającym, jest często najlepszym rozwiązaniem ze względu na zdolność do efektywnego zbierania niskoenergetycznych elektronów wtórnych, co minimalizuje ryzyko uszkodzenia próbki. Natomiast przy wyższych napięciach przyspieszających detektor SE2 może okazać się bardziej efektywny, gdyż umożliwia zbieranie elektronów z większej głębokości, co dostarcza dodatkowych informacji o strukturze wewnętrznej materiału. Ostateczny wybór detektora zależy od oczekiwanych rezultatów badania i preferencji użytkownika systemu.

2. Obrazy elektronów wstecznie rozproszonych (BSE)

Elektrony wstecznie rozproszone (BSE) to pierwotne elektrony, które odbijają się sprężysto od jąder atomowych próbki [1, 5], opuszczając obszar oddziaływania z minimalną utratą energii kinetycznej [1, 5, 10] (rys. 10). Współczynnik emisji tych elektronów, oznaczany jako η , nie zależy od napięcia przyspieszającego, a ich liczba jest stosunkowo mała w porównaniu do gęstości materiału..

Podobnie jak elektrony wtórne, BSE są wykorzystywane do tworzenia obrazów w SEM, jednak w przeciwieństwie do elektronów wtórnych, wydajność emisji BSE jest silnie związana z liczbą atomową Z [1]. Dzięki tej zależności technika obrazowania z użyciem elektronów wstecznie rozproszonych (BSE) jest szczególnie przydatna do rozróżniania faz o różnych liczbach atomowych [1].



Rys. 10. Schemat powstawania elektronów wstecznie rozproszonych [4]

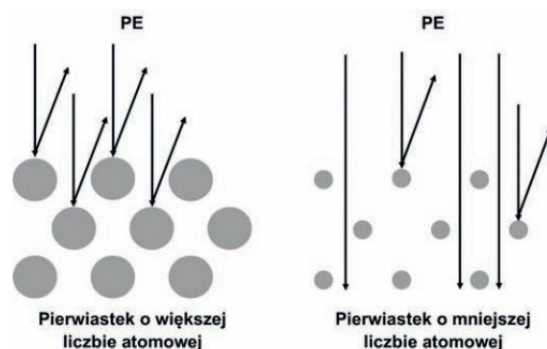
Elektrony BSE mogą dostarczać cennych informacji na temat topografii powierzchni próbki, jej składu chemicznego, a także wewnętrznej struktury krystalicznej.

Do detekcji sygnału BSE, oprócz wcześniej omówionego detektora SE2, używa się również innych detektorów.

- Detektor BSE może pracować zarówno w trybie topograficznym, jak i kompozycyjnym (rys. 11)
- Detektor EBSD (Electron BackScatter Diffraction) rejestruje dyfrakcję elektronów BSE.

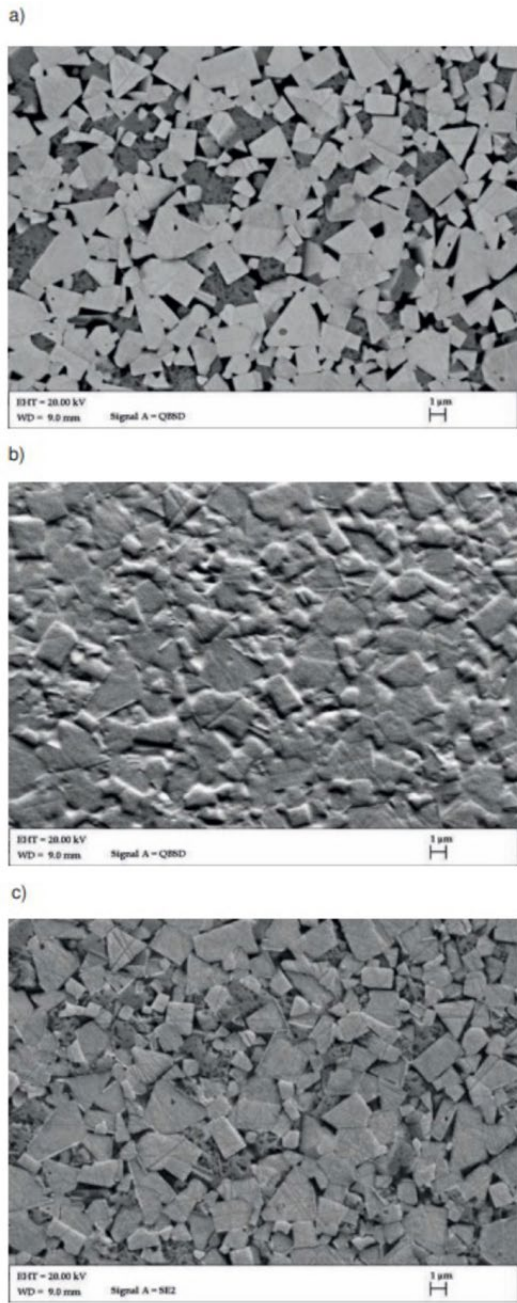
W przypadku obrazowania kompozycyjnego z wykorzystaniem BSE

kluczową rolę odgrywa średnia wartość liczby atomowej Z próbki. Obszary o wyższej średniej liczbie atomowej Z będą emitować silniejszy sygnał, co przełoży się na jaśniejsze obszary obrazu, w przeciwieństwie do obszarów o niższej liczbie atomowej Z , które będą ciemniejsze. Relacja pomiędzy jasnością obrazu a liczbą atomową próbki występuje wyłącznie przy dodatniej polaryzacji diod detektora, co oznacza, że detektor jest ustawiony w taki sposób, aby skutecznie zbierać elektrony wtórne emitowane z materiału. W tym przypadku materiały o wyższej liczbie atomowej emitują więcej elektronów wtórnych, co przekłada się na jaśniejszy obraz w mikroskopie skaningowym. Taki kontrast pozwala na identyfikację i rozmieszczenie obszarów różniących się średnią liczbą atomową (rys. 12).



Rys. 11. Schemat powstawania sygnału kompozycyjnego [4]

W trybie topograficznym obrazowanie powierzchni próbki z użyciem sygnału BSE odbywa się na podobnych zasadach jak w przypadku elektronów wtórnych, jednak sygnał BSE jest znacznie słabszy. Rysunek 12 przedstawia porównanie obrazów uzyskanych za pomocą detektora BSE w trybie kompozycyjnym (rys. 10a) i topograficznym (rys. 10b), a także za pomocą detektora SE2 (rys. 10c).



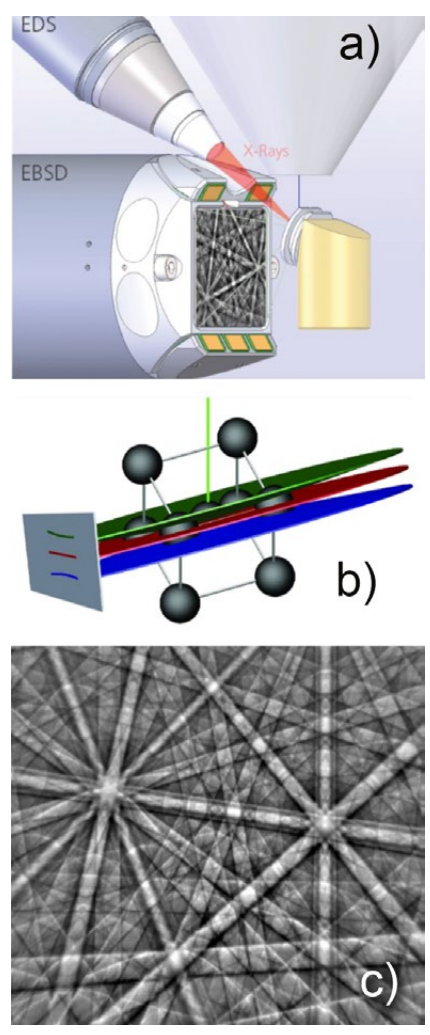
Rys. 12. Topografia powierzchni węglików spiekanych uzyskana przy użyciu detektorów: BSE w trybie: a) kompozycyjnym; b) topograficznym oraz c) SE2 [4]

W przypadku detekcji EBSD wykorzystywane jest zjawisko dyfrakcji elektronów BSE na płaszczyznach krystalograficznych w przypowierzchniowej warstwie badanego materiału. W mikroskopii elektronicznej skaningowej skupiona wiązka elektronów oddziałuje z nachyloną próbką pod kątem około 70° w stosunku do osi elektroooptycznej (rys. 13a). Efektem tego oddziaływania jest elastyczne rozpraszanie elektronów i związana z tym dyfrakcja elektronów na płaszczyznach krystalograficznych w warstwie przypowierzchniowej badanego materiału. Głębokość, z której pochodzi sygnał dyfrakcyjny, zależy od energii elektronów oraz średniej liczby atomowej próbki i zwykle nie przekracza 100 nm. Najczęściej dyfrakcyjny sygnał pochodzi z warstw około 50 nm pod powierzchnią próbki.

W głębszych warstwach materiału dyfrakcja również zachodzi, ale tylko niewielka część elektronów ulega ugięciu Bragga, co sprawia, że sygnał dyfrakcyjny jest słaby. Elastycznie ugięte elektrony na płaszczyznach kry-

stalograficznych, zgodnie z prawem Bragga, tworzą dwa stożki rozpraszania, znane jako stożki Kossela (rys. 13b). Efekt przecięcia tych stożków z płaszczyzną ekranu pokrytego luminoforem, umieszczonego blisko próbki, manifestuje się jako system pasm znanych jako linie Kikuchiego. Linie te są widoczne jako linie proste, ponieważ kąty wierzchołkowe stożków Kossela są bliskie 180°. Położenie tych linii jest specyficzne dla orientacji krystalograficznej i danego systemu symetrii (rys. 13c).

Do precyzyjnego zlokalizowania miejsca analizy stosuje się także obraz skaningowy modulowany sygnałem pochodzącym od elektronów rozproszonych pod innym kątem niż kąt ugięcia Bragga (ang. forward scatter electrons). W tym celu w obudowie ekranu kamery, pokrytej luminoforem, zamontowany jest system detektorów półprzewodnikowych [6].

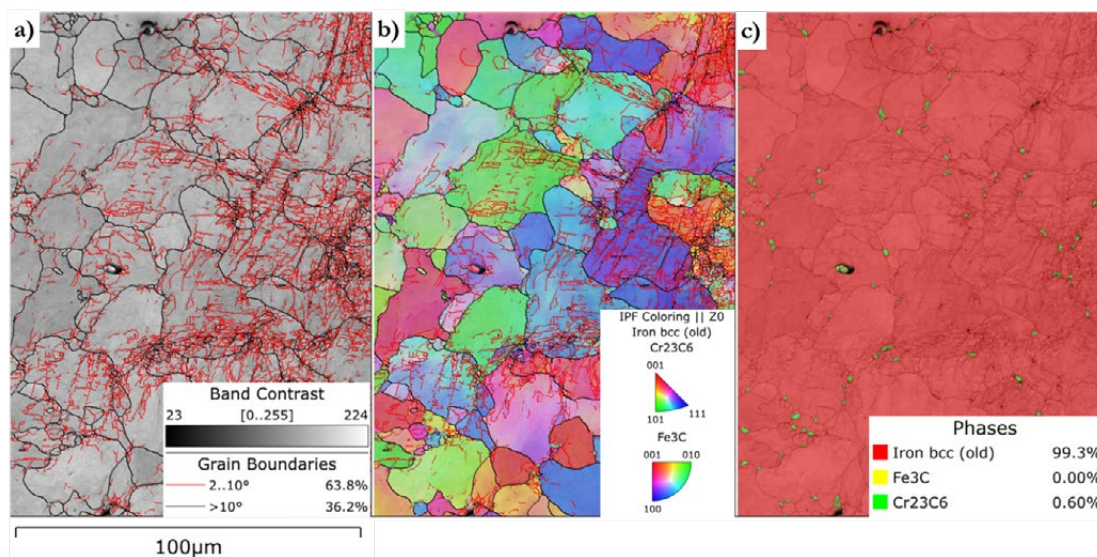


Rys. 13. Schemat metody EBSD: a) typowa geometria metody EBSD, przedstawiająca przechyloną próbkę oraz wzór dyfrakcyjny rzutowane na ekran luminoforu, b) schemat tworzenia stożków Kossela (zielony oraz niebieski okrąg) na danej płaszczyźnie krystalograficznej (czerwony okrąg), c) przykładowy wzór dyfrakcyjny [7, 8]

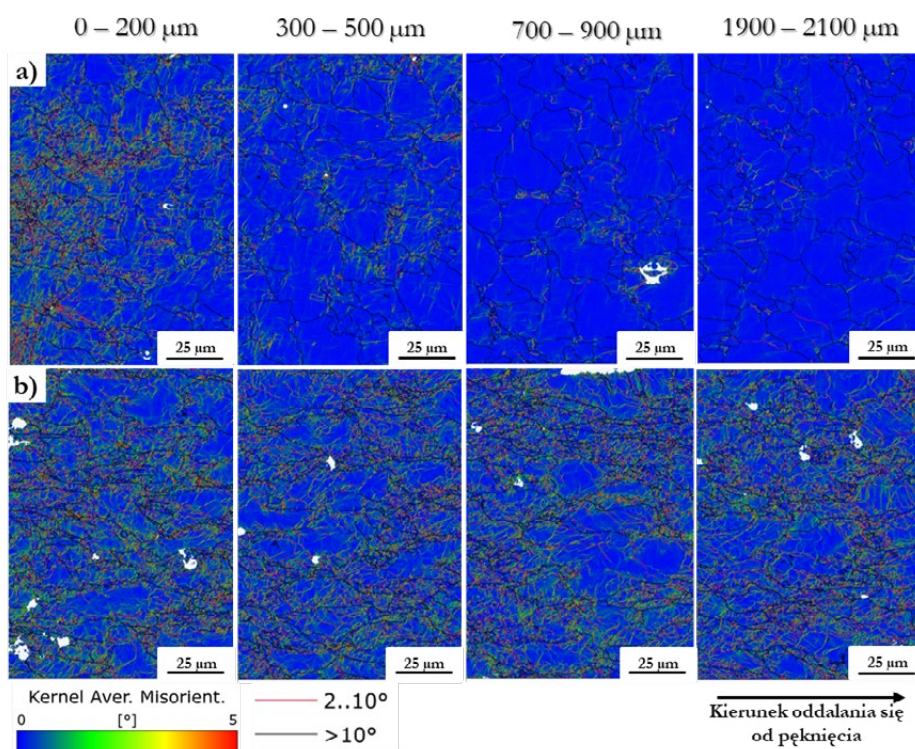
Zastosowanie detektora EBSD w mikroskopii SEM pozwala na precyzyjną identyfikację faz materiałowych oraz na analizę parametrów ziaren, takich jak ich wielkość, kształt oraz orientacja krystalograficzna. Dzięki temu możliwe jest przedstawienie wyników pomiarów orientacji krystalograficznej w formie map orientacji, profili dezorientacji, figur biegunowych (PF), odwrotnych figur biegunowych (IPF) czy funkcji rozkładu orientacji (rys. 14).

Skuteczność techniki EBSD zależy jednak od bardzo starannego przygotowania powierzchni badanego materiału. Powierzchnia musi być wyjątkowo gładka, ponieważ nawet drobne chropowatości mogą wywoływać efekt cienia (ang. *shadowing effect*), który może znacząco utrudnić, a nawet wykluczyć poprawną identyfikację zacienionych obszarów.

Na rysunku 15 przedstawiono wyniki analizy parametru Kernel Average Misorientation (KAM), który służy do oceny lokalnych odkształceń plastycznych w mikrostrukturze stali 14MoV6-3. Wartości KAM wskazują na intensywne odkształcenia w pobliżu pęknięcia, które stopniowo maleją w miarę oddalania się od tego miejsca, co widoczne jest na mapach z rysunku 15a. Natomiast rysunek 15b pokazuje, że w próbkach poddanych testom pełzania-zmęczenia (ang. Creep - Fatigue) wartości KAM są wyższe, co sugeruje bardziej równomierne rozłożenie odkształceń na całej długości materiału.

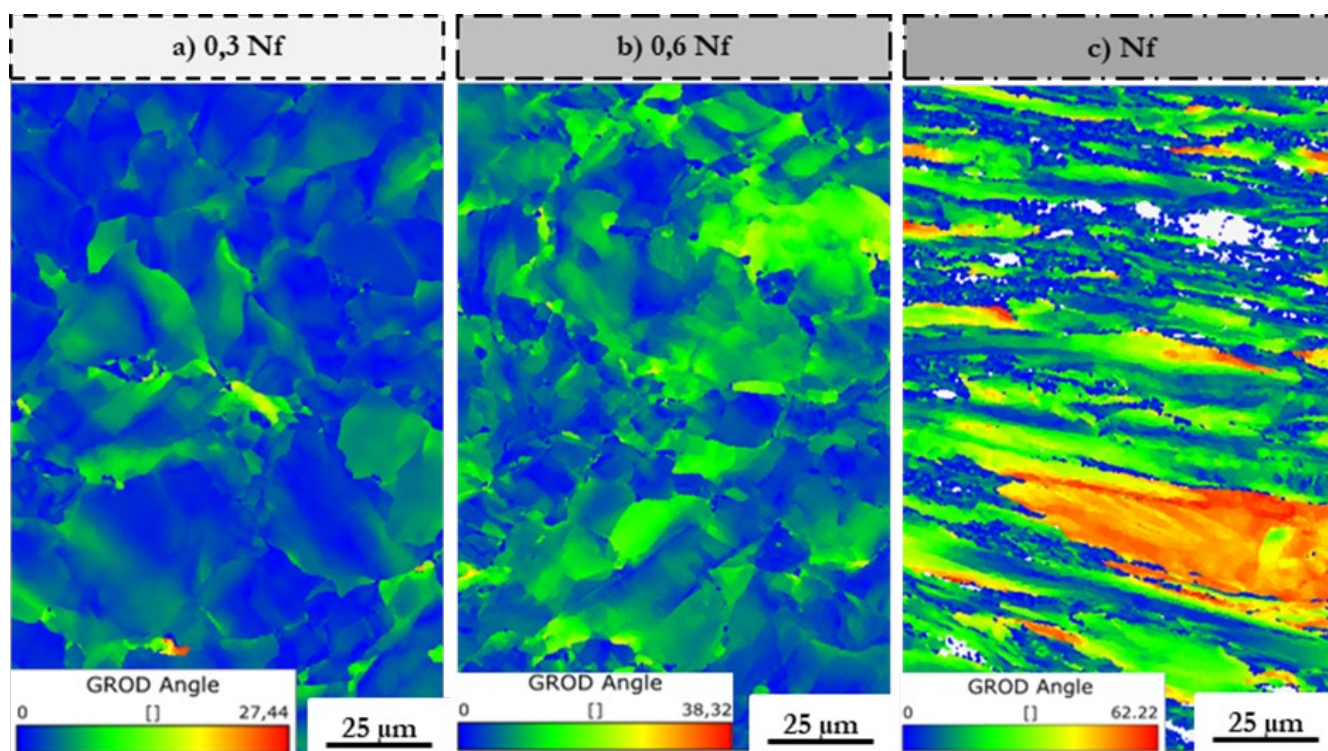


Rys. 14. Analiza EBSD materiału 14MoV6-3 po 302 000 h eksploatacji po badaniach zmęczenia niskocyklowego (LCF) w pobliżu pęknięcia: a) mapa kontrastu pasm, b) mapa orientacji krystalograficznej, c) mapa fazowa



Rys. 15. Zmiany parametru Kernel Average Misorientation KAM w funkcji odległości od pęknięcia stali 14MoV6-3 po 302 000 h: a) próby zmęczenia niskocyklowego LCF, b) próby pełzanie-zmęczenie CF

Na poniższym rysunku przedstawiono mapy GROD, które pokazują wzrost dezorientacji ziaren wraz z postępem cykli zmęczeniowych po próbach pełzanie-zmęczenie CF dla materiału 14MoV6-3, z najwyższymi wartościami w stanie bliskim do pełnego zniszczenia Nf (rys. 16). Analiza ta umożliwia precyzyjne zrozumienie mechanizmów deformacji oraz akumulacji uszkodzeń w materiale.



Rys. 16. Mapy Grain Reference Orientation Deviation (GROD) dla materiału 14MoV6-3 po 302 000 h eksploatacji w funkcji żywotności testów pełzanie-zmęczenie CF

3. Mikroanaliza rentgenowska EDS(ang. Energy Dispersive Spectroscopy)

Energia i długość fali promieniowania rentgenowskiego, które są charakterystyczne dla każdego pierwiastka, umożliwiają analizę składu chemicznego próbki, co stanowi podstawę techniki spektroskopii dyspersji energii (EDS) w mikroskopii skaningowej (SEM).

Proces wzbudzenia promieniowania rentgenowskiego rozpoczyna się, gdy pierwotna wiązka elektronów emitowana przez mikroskop skaningowy uderza w atomy próbki, wybijając elektrony z wewnętrznych powłok atomowych, takich jak powłoki K, L, M. Wybicie elektronu z niższego poziomu energetycznego tworzy wakat, który następnie zostaje wypełniony przez elektron pochodzący z wyższego poziomu energetycznego. Przemieszczenie elektronu między powłokami skutkuje emisją promieniowania rentgenowskiego, którego energia odpowiada różnicy energii pomiędzy tymi poziomami. Długość fali tego promieniowania wynosi od 0,7 do 110 Å [1], co pozwala na precyzyjną identyfikację pierwiastków na podstawie ich charakterystycznych widm rentgenowskich.

Charakterystyczne promieniowanie rentgenowskie jest unikalne dla każdego pierwiastka, ponieważ poziomy energetyczne elektronów są specyficzne dla struktury atomowej danego pierwiastka. To umożliwia dokładną analizę składu chemicznego próbki, gdyż detektor EDS rejestruje energię emitowanego promieniowania i przyporządkowuje je do poszczególnych pierwiastków. Energia promieniowania zmienia się monotonicznie wraz ze wzrostem liczby atomowej pierwiastka, co pozwala na łatwe rozróżnienie pierwiastków lekkich od ciężkich.

Mikroanaliza EDS jest powszechnie stosowaną techniką analityczną, szczególnie w mikroskopii skaningowej, gdzie pozwala na szybką i precyzyjną analizę jakościową i ilościową składu chemicznego materiału. Co istotne, technika ta jest w stanie wykrywać pierwiastki od liczby atomowej 4 (beryl) wzwyż, co czyni ją wszechstronnym narzędziem w badaniach z zakresu inżynierii materiałowej, metalurgii, biologii oraz innych dziedzin naukowych. Ważnym aspektem jest również fakt, że mikroanaliza EDS nie wymaga skomplikowanego przygotowania próbki, co czyni tę metodę szybką i efektywną, szczególnie w badaniach porównawczych i aplikacjach przemysłowych. Ponadto, ze względu na swoje właściwości, EDS może być stosowany w połączeniu z innymi technikami, takimi jak spektroskopia wstecznie rozproszonych elektronów (BSE) czy spektroskopia rozpraszania energii fotonów, co pozwala na uzyskanie szerszego obrazu właściwości analizowanych materiałów.

WYKORZYSTANIE SKANINGOWEJ MIKROSKOPII ELEKTRONOWEJ W UDT

Dział Badań Laboratoryjnych w Poznaniu dysponuje zaawansowanym mikroskopem skaningowym Zeiss Sigma 360VP, który jest kluczowym narzędziem w analizie mikrostruktury materiałów. Mikroskop ten umożliwia szczegółową ocenę stopnia degradacji materiałów po eksploatacji, w tym analizę replik metalograficznych, zgodnie z wytycznymi 1/2015 UDT [11]. Urządzenie jest nieocenione w wykonywaniu ekspertyz materiałowych, pozwalając na precyzyjną ocenę strukturalną i chemiczną badanych próbek. Dzięki szerokim możliwościom regulacji napięcia przyspieszającego oraz wyposażeniu w różnorodne detektory, takie jak detektor elektronów wtórnych Everhart-Thornley (E-T) i detektor wewnątrzsoczewkowy In-lens, mikroskop umożliwia badanie zarówno próbek przewodzących, jak i nieprzewodzących.

Mikroskop Zeiss Sigma 360VP oferuje szeroki zakres możliwości badawczych, pozwalając na analizę nie tylko materiałów metalicznych, ale także materiałów ceramicznych, tworzyw sztucznych, włókien, proszków, a nawet preparatów biologicznych. Dzięki zaawansowanym funkcjom i wszechstronności, urządzenie to może być stosowane w badaniach nad mikrostrukturą różnych materiałów w wielu dziedzinach, takich jak przemysł, nauka o materiałach czy medycyna.

Powiększenie dostępnego mikroskopu w laboratorium UDT to ponad 1 000 000x, co umożliwia obserwację zarówno dużych struktur, jak i drobnych detali na poziomie nanometrycznym. Jego zdolność rozdzielcza poniżej 1nm pozwala na precyzyjną analizę mikrostrukturalną nawet w przypadku skomplikowanych materiałów. Mikroskop Zeiss Sigma 360VP jest również wyposażony w technologię zmiennej próżni, co pozwala na badanie próbek w warunkach niskiej próżni, idealnych do analizy materiałów nieprzewodzących, takich jak polimery czy materiały ceramiczne, bez potrzeby ich powlekania.

Dzięki zaawansowanym funkcjom, mikroskop ten może być wykorzystywany do badania mechanizmów degradacji materiałów, takich jak pełzanie, zmęczenie, korozja, w tym korozja wodorowa, co ma kluczowe znaczenie w przemyśle energetycznym. Jednocześnie Zeiss Sigma 360VP pozwala na zgodne z międzynarodowymi normami, takimi jak VDA 19.1 („Kontrola techniczna czystości – Badanie technicznej czystości w produkcji motoryzacyjnej – Cząstki z funkcjonalnych powierzchni komponentów”), prowadzenie analiz zanieczyszczeń, które są kluczowe w przemyśle motoryzacyjnym i technicznym.

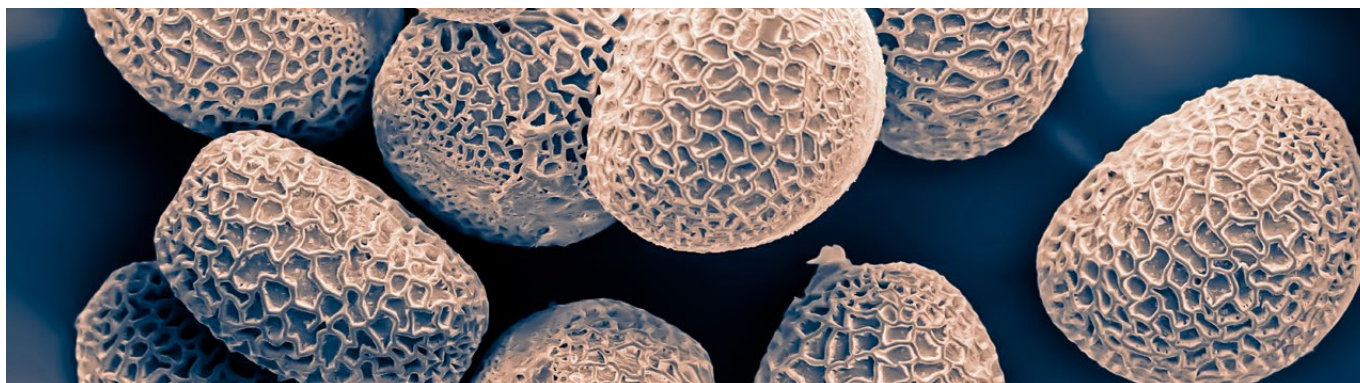
Urządzenie podnosi standardy badań laboratoryjnych w UDT, przyczyniając się do poprawy bezpieczeństwa i niezawodności w szerokim zakresie zastosowań, od przemysłowych instalacji energetycznych po analizę materiałów geologicznych i biologicznych.



Rys. 17. Skaningowy mikroskop elektronowy Zeiss Sigma 360VP [9]

Literatura:

1. Kelsall, R. W., Hamley, I. W., Geoghegan, M. (2008). Nanotechnologie. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN
2. Barbacki, A. (2003). Mikroskopia elektronowa. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej
3. Zhou, W., Apkarian, R., Wang, Z. L., Joy, D. (2006). Fundamentals of scanning electron microscopy (SEM). In Scanning microscopy for nanotechnology (1–40). https://doi.org/10.1007/978-0-387-39620-0_1
4. Boryło, P., Sozańska-Jędrasik, L., Gołombek, K. (2019). Zastosowanie skaningowej mikroskopii elektronowej w badaniach materiałów inżynierskich. LAB – Laboratoria, Aparatura, Badania, (2), Art. nr 2.
5. Vaughan, D. (n.d.). Energy-dispersive X-ray microanalysis: An introduction. Middleton, WI: NORAN Instruments. Retrieved from <http://www.noran.com>
6. Faryna, M. (2009). Dyfrakcja elektronów wstecznie rozproszonych – kilka uwag praktycznych. Inżynieria Materiałowa, 1, 5–11.
7. How does EBSD work? <https://www.ebsd.com/ebsd-for-beginners/how-does-ebsd-work> [dostęp: 09.2024]
8. Electron Backscatter Diffraction (EBSD) Pattern Formation <https://www.ebsd.com/ebsd-explained/pattern-formation> [dostęp: 09.2024]
9. ZEISS Microscopy: ZEISS SIGMA VP FE-SEM | With its variable pressure modes of ... | Flickr [dostęp: 09.2024]
10. Ryczkowski, J. (red.). „Adsorbenty i Katalizatory: Wybrane technologie a środowisko”, Rozdział 12, Uniwersytet Rzeszowski, 2012, ISBN 978-83-931292-8-7
11. Wytyczne Urzędu Dozoru Technicznego nr 1/2015 - Zasady diagnostyki i oceny trwałości eksploatacyjnej elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania https://www.udt.gov.pl/images/Wytyczne_1_2015-ZASADY-DIAGNOSTYKI-I-OCENY-TRWAIOSCI-EKSPLOATACYJNEJ-ELEMENTOW-KOTIOW_I-RUROCIAGOW-PRACUJACYCH-W-WARUNKACH-PELZANIA_2_WCAG.pdf





CLDT

Dział Badań Laboratorium w Poznaniu

ROZWÓJ LABORATORIUM BADAŃ KOMPATYBILNOŚCI ELEKTROMAGNETYCZNEJ W CLDT



MGR AGNIESZKA PLEC

Specjalista ds. Badań Urządzeń Technicznych
Dział Badań Laboratoryjnych w Poznaniu
Urząd Dozoru Technicznego

W Centralnym Laboratorium Dozoru Technicznego (CLDT) powstało nowoczesne laboratorium przeznaczone do badań kompatybilności elektromagnetycznej (EMC – ang. Electromagnetic Compatibility). Kompatybilność elektromagnetyczna to zdolność urządzenia elektrycznego lub elektronicznego do poprawnej pracy w środowisku elektromagnetycznym.

Badania kompatybilności elektromagnetycznej wykonuje się w celu wykazania zgodności urządzeń z zasadniczymi wymaganiami dyrektywy 2014/30/UE (EMC) [1], a sam proces oceny zgodności polega na sprawdzeniu, czy badane urządzenie spełnia wymagania norm zharmonizowanych z dyrektywą. Producent zobowiązany jest do sporządzenia deklaracji zgodności CE i oznakowania swojego wyrobu znakiem CE. W tym celu wymagane jest wykonanie oceny badań kompatybilności elektromagnetycznej.

Wraz z rozwojem elektroniki i nowych technologii pojawia się coraz większy poziom zaburzeń elektromagnetycznych. Skutki takich zakłóceń mogą wpływać negatywnie na pracę urządzeń systemów i instalacji. Ważne jest więc, żeby urządzenia te wzajemnie się nie zakłócały, czyli były kompatybilne elektromagnetycznie.

Dziedzina badań EMC dzieli się na dwie kategorie: emisję i odporność.

Urządzenie jest kompatybilne elektromagnetycznie wtedy, gdy:

- nie zaburza pracy innych urządzeń (nie emituje powyżej określonych limitów),
- jest odporne na zaburzenia występujące w środowisku elektromagnetycznym, w którym pracuje.

Nowe wymagania norm produktowych i badawczych w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej są istotne z punktu widzenia stale rozwijającej się automatyzacji, robotyzacji i szeroko rozumianego obszaru urządzeń internetu rzeczy (IoT – ang. Internet of Things), w których powszechne jest stosowanie komunikacji bezprzewodowej. Badania EMC zapewniają nie tylko prawidłowe funkcjonowanie urządzeń, ale także bezpieczeństwo ich użytkowania.

CEL I ZAKRES INWESTYCJI

Zaawansowana infrastruktura badawcza pozwoli na analizę wpływu nowych technologii i urządzeń na środowisko, w którym pracują. Laboratorium umożliwi przeprowadzanie kompleksowych badań EMC, a także pozwoli pozyskać szerokie grono klientów, w tym międzynarodowych.

Atutem nowego laboratorium EMC będzie wysokiej klasy aparatura pomiarowa spełniająca wymagania europejskich norm z zakresu EMC.

Cała inwestycja składa się z dwóch głównych etapów:

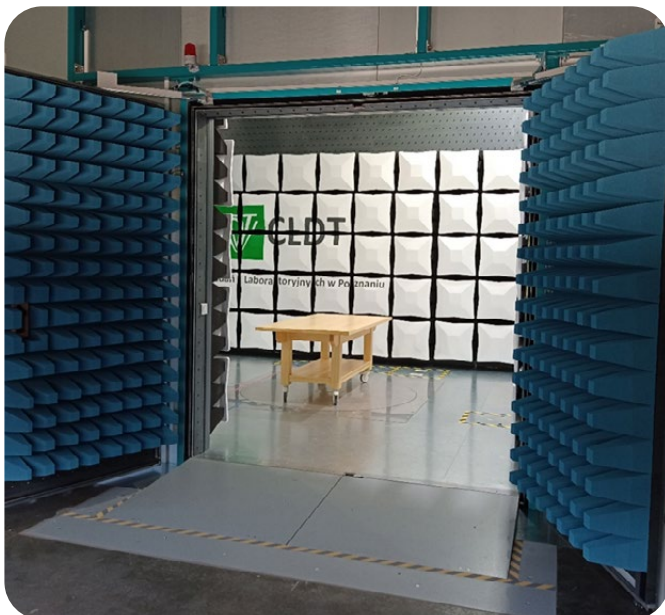
- **I etap** obejmuje budowę komory semibezodbiowej (SAC – ang. Semi Anechoic Chamber), pomieszczenia wzmacniaczy, klatki Faradaya wraz z instalacją elektryczną i uziemieniem doprowadzonym do laboratorium, pełne dostosowanie do panujących warunków lokalowych, do laboratorium, pełnego dostosowania do panujących warunków lokalowych,
- **II etap** obejmuje zakup wyposażenia pomiarowo-badawczego do laboratorium EMC.

Realizowane działania pozwolą na certyfikację wyrobów, prowadzenie kompleksowych badań EMC oraz wykonywanie wstępnej oceny urządzeń już na etapie projektowania. Na podstawie badań wykonanych w Dziale Badań Laboratoryjnych producent będzie mógł oznakować swój produkt znakiem CE i wprowadzić na rynek Unii Europejskiej.

Laboratorium badań kompatybilności elektromagnetycznej jest zlokalizowane w CLDT Poznaniu. Nowa lokalizacja laboratorium ułatwia proces logistyki związanej z badaniami. Dostawa urządzenia, jego rozładunek i umieszczenie w komorze przebiegają bez większych przeszkód. Odpowiednie rozdzielanie stanowisk pomiarowych optymalizuje czas potrzebny na wykonywanie badań, a tym samym umożliwia zbadanie większej liczby urządzeń w tym samym czasie.

NOWA KOMORA SAC

Nowa komora SAC umożliwia badanie szerokiego zakresu urządzeń elektrycznych i elektronicznych, w tym urządzeń o dużych gabarytach. Przeznaczona jest do wykonywania pomiarów w zakresie emisji i odporności promieniowanej z odległości 3 m od badanych obiektów. Badane urządzenia powinny mieścić się w cylindrze pomiarowym o wysokości i średnicy wynoszącej 2 m, o masie do 1000 kg. W komorze zainstalowano dwuskrzydłowe drzwi ekranowane z automatyczną rampą w celu zminimalizowania różnic poziomów pomiędzy podłogą techniczną w komorze a podłogą na zewnątrz (rys.1, rys. 2).



Rys. 1. Wejście do komory SAC w laboratorium EMC



Rys.2. Drzwi ekranowane do komory SAC

Komora jest pomieszczeniem ekranowanym, wykonanym z paneli stalowych tworzących klatkę Faradaya. Dodatkowo ściany i sufit pokryto materiałem absorbującym fale elektromagnetyczne w postaci płytek ferrytowych oraz absorberów piramidalnych (poliuretan wypełniony grafitem). Układ absorberów został zaprojektowany w taki sposób, aby zapewnić jak najlepsze tłumienie odbić. (rys. 3).

W komorze zainstalowano następujące pozycjonery:

- stół obrotowy o średnicy 2 m i obciążalności 1000 kg,
- maszt antenowy o wysokości skanowania od 1 do 4 m,
- sterownik masztu i stołu obrotowego.



Rys. 3. Stanowisko badawcze wewnątrz komory SAC

Komora posiada system audiowizualny przeznaczony do rejestracji przebiegu badań. W konstrukcji wykorzystano panele przejściowe i podłogowe oraz zapewniono systemy wentylacji i detekcji dymu. W panelach podłogowych znajduje się wymagana instalacja (gniazda koncentryczne, optyczne, zasilające, pneumatyczne, sygnałowe) umożliwiającą zasilanie urządzeń pomiarowych, obiektów badanych i ich komunikację z urządzeniami poza komorą.

Komora SAC została zwalidowana w zakresie następujących parametrów:

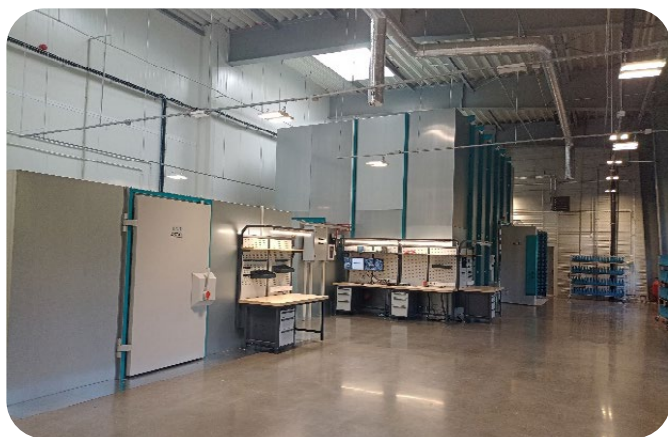
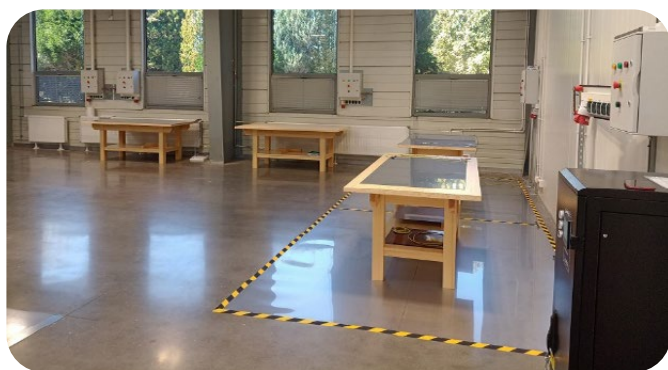
- SE (skuteczność ekranowania) w zakresie częstotliwości od 10 kHz do 40 GHz,
- NSIL (znormalizowana tłumienność środowiska) w zakresie częstotliwości od 9 kHz do 30 MHz,
- NSA (współczynnik antenowy) w zakresie częstotliwości od 30 MHz do 1 GHz,
- sVSWR (współczynnik fali stojącej środowiska pomiarowego) w zakresie częstotliwości od 1 GHz do 18 GHz,
- UFA (jednorodność pola) w zakresie częstotliwości od 80 MHz do 18 GHz,
- poziomu tła elektromagnetycznego w zakresie częstotliwości do 30 MHz do 18 GHz.

Walidacja została przeprowadzona przez niezależne, akredytowane laboratorium badawcze.

Wraz z komorą zapewnione zostało w pełni funkcjonalne ekranowane pomieszczenie dla wzmacniaczy służących do generowania pola elektromagnetycznego o częstotliwości radiowej oraz dodatkowe pomieszczenie klatki Faradaya wymagane do stanowisk pomiarowych emisji i odporności przewodzonej (rys. 4). W ramach inwestycji wykonano również instalacje dla stanowisk pomiarowych EMC poza komorą (rys. 5).



Rys. 4. Pomieszczenie klatki Faradaya wymagane do stanowisk pomiarowych emisji i odporności przewodzonej



Rys. 5. Instalacje dla stanowisk pomiarowych EMC poza komorą

Rozwój laboratorium związany jest z koniecznością rozszerzenia dotychczasowych zakresów pomiarowych i wprowadzenia nowych metod pomiarowych w zakresie badań kompatybilności elektromagnetycznej. Główna potrzeba dotyczyła rozszerzenia zakresu pomiarowego emisji zaburzeń promieniowanych i odporności na pole elektromagnetyczne do częstotliwości 6 GHz, który jest już obowiązujący w większości norm produktowych.

Ponadto norma PN-EN 60601-1-2:2015/A1:2021 wprowadziła wymóg badania odporności na pole radiowe pochodzące od urządzeń, które znajdują się w bliskiej odległości, zgodnie z normą metody badawczej PN-EN 61000-4-39:2017. Dodatkowo wprowadzone zostały nowe wyma-

gania w zakresie walidacji parametrów komór bezodbiciowych zgodnie z normą PN-EN IEC 55016-1-4:2019 + A1:2021. Planowana jest aktualizacja zakresu akredytacji PCA o nowe edycje norm z uwzględnieniem nowych zakresów pomiarowych.

ROZSZERZENIE ZAKRESU AKREDYTACJI NA ZGODNOŚĆ Z NORMĄ PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02

W związku z rozwojem laboratorium badań kompatybilności elektromagnetycznej planowane jest rozszerzenie i zaktualizowanie zakresu akredytacji w następującym zakresie:

- PN-EN 55016-2-1:2014 + A1: 2017 Pomiar napięć zaburzeń radioelektrycznych na portach zasilania (w zakresie częstotliwości od 9 kHz do 30 MHz) i telekomunikacyjnych (w zakresie częstotliwości od 150 kHz do 30 MHz),
- PN-EN 55016-2-3:2017 + A1:2020 + A2:2024 Pomiar zaburzeń promieniowanych w komorze SAC w zakresie częstotliwości od 30 MHz do 6 GHz,
- PN-EN 61000-4-39: 2017 Pomiar odporności na pole radiowe w bliskiej odległości,
- PN-EN 55015: 2019 + A11:2020 Pomiar emisji pola magnetycznego w zakresie częstotliwości od 9 kHz do 30 MHz,
- PN-EN 55014-1:2021 Pomiar mocy zaburzeń w zakresie częstotliwości od 30 do 300 MHz,
- PN-EN 61000-4-29:2004 Badanie odporności na zapady napięcia, krótkie przerwy i zmiany napięcia występujące w przyłączy zasilającym prądu stałego,
- nowe edycje norm metod pomiarowych: PN-EN 61000-4-3:2021, PN-EN 61000-4-6:2024, PN-EN 61000-4-9:2016, PN-EN 61000-4-11:2020, PN-EN 61000-3-2:2019,
- nowe edycje norm produktowych i środowiskowych: PN-EN 55032:2015, PN-EN 55015:2021, PN-EN 55014-1, PN-EN 60601-1-2, PN-EN 61000-6-1, PN-EN 61000-6-2.

Producenci urządzeń elektrycznych i elektronicznych, korzystając z usług akredytowanych laboratoriów badawczych, mają możliwość potwierdzenia spełnienia wymagań zawartych w normach zharmonizowanych z dyrektywą EMC. Omawiana inwestycja zwiększy możliwości badawcze CLDT i znacząco poprawi rozpoznawalność Urzędu Dozoru Technicznego w obszarze badań kompatybilności elektromagnetycznej.

Literatura:

1. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/30/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=CELEX%3A32014L0030>
2. PN-EN 60601-1-2:2015/A1:2021 Medyczne urządzenia elektryczne -- Część 1-2: Wymagania ogólne dotyczące bezpieczeństwa podstawowego oraz funkcjonowania zasadniczego -- Norma uzupełniająca: Zakłócenia elektromagnetyczne -- Wymagania i badania
3. PN-EN 61000-4-39:2017 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) -- Część 4-39: Metody badań i pomiarów -- Pola radiowe w bliskiej odległości -- Badanie odporności
4. PN-EN IEC 55016-1-4:2019 Wymagania dotyczące aparatury pomiarowej i metod pomiarów zaburzeń radioelektrycznych oraz odporności na zaburzenia -- Część 1-4: Aparatura do pomiaru zaburzeń radioelektrycznych i do badań odporności -- Anteny i poligony pomiarowe do pomiaru zaburzeń promieniowanych

ZAGROŻENIA WYNIKAJĄCE Z ODDZIAŁYWANIA HAŁASU

Zmiany wymagań w zakresie ograniczenia emisji hałasu przez maszyny i wyposażenie techniczne budynków



MGR INŻ. JAROSŁAW KUBACKI

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



Jak wynika z publikowanych w Polsce, Europie i na całym świecie wyników badań [1][2], hałas jest jednym z powszechnie występujących czynników zagrażających naszemu zdrowiu. Hałas, czyli każdy niepożądany, nieprzyjemny, dokuczliwy dźwięk, występuje w budynkach, w których mieszkamy, na stanowiskach pracy, na rozległych przestrzeniach naszych miast, nawet w miejscach wypoczynku i rekreacji. Dodatkowo wprowadzamy sobie sami hałas bezpośrednio do uszu, stosując słuchawki podczas rozmów telefonicznych, słuchania muzyki i w pracy, np. w czasie wideokonferencji. Często nie zdajemy sobie sprawy, jak niebezpieczny dla naszego zdrowia fizycznego i psychicznego jest to czynnik zagrożenia. Skutki oddziaływania hałasu mogą być wielorakie, od rozdrażnienia, zaburzeń snu, przez zmniejszenie wydajności pracy i trudności w koncentracji aż do chorób układu krążenia i układu nerwowego.



Autor jest ekspertem Jednostki Notyfikowanej UDT nr 1433 i przedstawicielem UDT na spotkaniach grupy eksperckiej przy Komisji Europejskiej oraz grupy Jednostek Notyfikowanych dotyczącej dyrektywy 2000/14/WE

Hałas w zależności od obszaru występowania można najogólniej podzielić na:

- przemysłowy,
- komunikacyjny,
- komunalny,
- mieszkaniowy.

W ostatnim czasie podjęte zostały nowe poważne działania na poziomie prawodawstwa Unii Europejskiej oraz prawa krajowego, których celem jest zmniejszenie ryzyka niedopuszczalnego oddziaływania hałasu na ludzi.

Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego, jako akredytowane laboratorium badawcze [3], wykonując pomiary akustyczne m.in.:

- maszyn emitujących hałas do środowiska,
 - wyposażenia technicznego budynków,
- monitoruje te działania i dostosowuje swoje zdolności badawcze do zmieniających się wymagań.

DYREKTYWA 2000/14/WE I ROZPORZĄDZENIE RADY (UE)

Pierwszym obszarem, w którym wprowadzono istotne zmiany, jest dyrektywa 2000/14/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 8 maja 2000 r. [4] w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do emisji hałasu do środowiska przez urządzenia używane na zewnątrz pomieszczeń.

Wymagania dyrektywy 2000/14/WE, obowiązujące od 3 stycznia 2002 r., zostały ustanowione w celu zmniejszenia emisji hałasu urządzeń pracujących na zewnątrz pomieszczeń dla ochrony zdrowia i dobrostanu obywateli, a także środowiska naturalnego. Jej wymagania dotyczą 57 rodzajów urządzeń, w tym: żurawi, wózków jezdniowych podnośnikowych, podestów ruchomych, agregatów prądotwórczych, mieszalników do betonu, kontenerów do odzysku szkła i wielu innych.

Przegląd wdrożenia i stosowania dyrektywy 2000/14/WE prowadzony przez Komisję Europejską w latach 2017–2020 wykazał szereg zagrożeń, które miały negatywny wpływ na funkcjonowanie dyrektywy.

Jednym z nich było niedostosowanie procedur badania hałasu i metod pomiarowych wskazanych w załączniku III dyrektywy do rozwoju technologicznego urządzeń objętych dyrektywą.

Na tej podstawie Komisja Europejska w latach 2021–2023 przygotowała, a następnie wydała **rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2024/1208 [5] z dnia 16 listopada 2023 r. zmieniające dyrektywę 2000/14/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w odniesieniu do metod pomiaru hałasu emitowanego przez urządzenia używane na zewnątrz pomieszczeń.**

Wymagania rozporządzenia 2024/1208 będą obowiązywać od dnia 22 maja 2025 r.

O przygotowaniach do wydania rozporządzenia delegowanego informowaliśmy w numerze 3/2022 biuletynu „Inspektor – Technika i bezpieczeństwo”.

ZASADNICZE ZMIANY

Zmiany metod pomiarowych w załączniku III dyrektywy obejmują zastąpienie szczegółowych wymagań technicznych zawartych w poprzednim załączniku III powołaniem norm europejskich lub aktualizacją wydań norm już wyszczególnionych w tekście załącznika.

Pierwsza zmiana, jaką można zauważyć już na wstępie, to zmiana normy:

- EN ISO 3744:1995 [6] (PN-EN ISO 3744:1999) Akustyka – Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego – Metoda techniczna stosowana w warunkach zbliżonych do pola swobodnego nad płaszczyzną odbijającą dźwięk na normę;
- EN ISO 3744:2010 [7] (PN-EN ISO 3744:2011).

Usunięto również przywołanie normy EN ISO 3746:1995 [8] (PN-EN ISO 3746:1999).

Wymagania normy PN-EN ISO 3744:2011 znacznie dokładniej w stosunku do poprzedniego wydania normy określają warunki i sposób prowadzenia badań. Stawiają m.in. wyższe wymagania co do liczby stosowanych mikrofonów podczas wyznaczania emisji hałasu dla urządzenia, co pozwala na zmniejszenie niepewności wyznaczenia mocy akustycznej.

Poza powyżej opisanymi zmianami dotyczącymi standardowej metodyki wyznaczania mocy akustycznej wprowadzono bardzo dużą liczbę zmian szczegółowych dotyczących metod pomiarowych dla poszczególnych rodzajów maszyn.

Inną istotną zmianą wprowadzoną do tekstu załącznika III jest zapis o preferowaniu równoczesnego wykonywania pomiarów we wszystkich pozycjach mikrofonów, zwłaszcza dla pomiarów dynamicznych. W przypadku braku takiej możliwości zaleca się zwrócić szczególną uwagę na zapewnienie stabilnych warunków w środowisku testowym i zminimalizowanie ryzyka włączenia niepożądanych zmian w hałasie emitowanym przez maszynę, w hałasie tła, w warunkach meteorologicznych itp.

Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego ma w zakresie akredytacji AB 001 obydwie wymienione normy, tj. PN-EN ISO 3744:2011 i PN-EN ISO 3744:1999.

- Podsumowując wprowadzone zmiany w zakresie metod wyznaczania mocy akustycznej maszyn, należy zauważyć, że zmierzają one do podwyższenia jakości wykonywanych pomiarów i zmniejszenia niepewności pomiarów.
- Polegają również na aktualizacji wymagań zwłaszcza w odniesieniu do rodzajów maszyn, w których zastosowane rozwiązania konstrukcyjne uległy w czasie obowiązywania dyrektywy 2000/14/WE istotnym zmianom.

Wprowadzone w III załączniku do dyrektywy 2000/14/WE zmiany nie dotyczyły procedur oceny zgodności ani wartości dopuszczalnych poziomu mocy akustycznej ustanowionych w artykule 12 dyrektywy. Tego rodzaju zmiany nie mogą być wprowadzane poprzez wydanie rozporządzenia delegowanego Komisji Europejskiej. W związku z powyższym Komisja Europejska przewiduje w najbliższych latach rozpoczęcie prac nad całkowicie nowym wydaniem dyrektywy hałasowej.

WYPOSAŻENIE TECHNICZNE BUDYNKÓW

Drugim obszarem, w którym wprowadzono istotne zmiany, tym razem w zakresie prawa krajowego, są wymagania akustyczne dotyczące wyposażenia technicznego budynków. **W dniu 27 października 2023 r. zostało wydane rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii zmie-**

niające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. z 2023 r., poz. 2442) [9].

W zmienionym rozporządzeniu umieszczono jako obowiązujące dwie normy związane z wymaganiami akustycznymi:

- PN-EN ISO 10052:2007 Akustyka – Pomiary terenowe izolacyjności od dźwięków powietrznych i uderzeniowych oraz **hałasu od urządzeń wyposażenia technicznego** – Metoda uproszczona [10],
- PN-B-02151-2:2018-01 Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 2: **Wymagania dotyczące dopuszczalnego poziomu dźwięku w pomieszczeniach** [11].

Zmiany obowiązują od dnia 1 kwietnia 2024 r.

Wprowadzenie tych norm niesie za sobą istotne zmiany wymagań podczas projektowania, budowy i przebudowy oraz przy zmianie sposobu użytkowania budynków. Powyższe normy zastąpiły poprzednio obowiązujące normy dotyczące metod badawczych oraz wartości dopuszczalnych odpowiednio PN-87/B-02156 [12] i PN-87/B-02151/02 [13].

NAJWAŻNIEJSZE RÓŻNICE W WYMAGANIACH

● PRECYZYJNE OKREŚLENIE SPOSOBU PRACY URZĄDZEŃ TECHNICZNYCH PODCZAS POMIARÓW

Dla dźwigu (przykład) w załączniku nr B.5 normy PN-EN ISO 10052:2007 podano: „Winda powinna zostać obciążona przez 1 osobę lub 2 osoby”. „Winda startuje z najniższego możliwego poziomu. Zatrzymywac windę na każdym pośrednim poziomie, otwierać i zamykać drzwi (jeśli są otwierane ręcznie, to bez użycia siły). Kiedy winda dojedzie na najwyższy poziom w szybie, sprowadzić ją do najniższego możliwego poziomu i wtedy otworzyć i zamknąć drzwi”.

● REZYGNACJA Z WYMAGAŃ DOTYCZĄCYCH DOPUSZCZALNEGO POZIOMU DŹWIĘKU W POMIESZCZENIACH TECHNICZNYCH (NP. MASZYNOWNIACH DŹWIGÓW).

● **ZASTOSOWANIE PRZY WYZNACZANIU MAKSYMALNEGO POZIOMU DŹWIĘKU A CZASOWEJ CHARAKTERYSTYKI KOREKCYJNEJ F (FAST)** w odróżnieniu od starych wymagań, zgodnie z którymi stosowano charakterystykę korekcyjną S (*slow*).

● **ZASTOSOWANIE KRÓTSZEGO CZASU UŚREDNIANIA PRZY WYZNACZANIU RÓWNOWAŻNEGO POZIOMU DŹWIĘKU A OGRANICZONEGO DO JEDNEGO CYKLU PRACY URZĄDZENIA TECHNICZNEGO** opisanego w normie, np. takiego jak opisane powyżej dla dźwigu. W starych wymaganiach jako wartość równoważnego poziomu dźwięku stosowano wartość wyznaczoną np. w nocy w ciągu najniekorzystniejszej półgodziny i w dzień podczas najniekorzystniejszych 8 godzin.

Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego ma w zakresie akredytacji AB 001 obydwie wymienione normy dotyczące metod badawczych, tj. PN-EN ISO 10052:2007 i PN-87/B-02156.

AKTUALIZACJA WYMAGAŃ DLA BEZPIECZEŃSTWA

- Podsumowując, należy stwierdzić, że w porównaniu do wymagań poprzednio stosowanych norm w sposób istotny podwyższone zostały wymagania akustyczne w zakresie wartości równoważnego poziomu dźwięku zwłaszcza dla dźwigów o niewielkiej intensywności pracy z uwagi na zmianę czasu obserwacji stosowanego podczas pomiarów.
- Wymagania w odniesieniu do wartości maksymalnego poziomu dźwięku zmieniono w niewielkim stopniu w związku ze zmianą wymagań w zakresie stosowanej charakterystyki korekcyjnej z S (*slow*) na F (*fast*).

Opisane w artykule zmiany dotyczące wymagań prawnych dla maszyn emitujących hałas do środowiska i wyposażenia technicznego budynków były oczekiwane od wielu lat. Poprzez wprowadzenie aktualnych wydań norm opisujących metody badań akustycznych wymagania aktów prawnych nadążają za aktualnym poziomem wiedzy technicznej. Zapewnienie zgodności użytkowanych maszyn i wyposażenia w zakresie wymagań akustycznych przyczynia się do ograniczenia ryzyka niedopuszczalnego oddziaływania hałasu na ludzi.

Literatura:

1. Centrum Badań Opinii Społecznej https://www.cbos.pl/PL/publikacje/raporty_tekst.php?id=3930
2. Europejska Agencja Środowiska <https://noise.eea.europa.eu/>
3. Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego – zakres akredytacji AB001 <https://www.pca.gov.pl/akredytowane-podmioty/akredytacje-aktywne/laboratoria-badawcze/AB%20001,podmiot.html> [dostęp: 09.2024]
4. DYREKTYWA 2000/14/WE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY z dnia 8 maja 2000 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do emisji hałasu do środowiska przez urządzenia używane na zewnątrz pomieszczeń <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=CELEX%3A32000L0014> [dostęp: 09.2024]
5. ROZPORZĄDZENIE DELEGOWANE KOMISJI (UE) 2024/1208 z dnia 16 listopada 2023 r. zmieniające dyrektywę 2000/14/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w odniesieniu do metod pomiaru hałasu emitowanego przez urządzenia używane na zewnątrz pomieszczeń <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1208> [dostęp: 09.2024]
6. EN ISO 3744:1995 (PN-EN ISO 3744:1999) Akustyka - Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego - Metoda techniczna stosowana w warunkach zbliżonych do pola swobodnego nad płaszczyzną odbijającą dźwięk
7. EN ISO 3744:2010 (PN-EN ISO 3744:2011) Akustyka - Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego - Metoda techniczna stosowana w warunkach zbliżonych do pola swobodnego nad płaszczyzną odbijającą dźwięk
8. EN ISO 3746:1995 (PN-EN ISO 3746:1999) Akustyka -- Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego -- Metoda orientacyjna z zastosowaniem otaczającej powierzchni pomiarowej nad płaszczyzną odbijającą dźwięk
9. Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. z 2023 r., poz. 2442)
10. PN-EN ISO 10052:2007 Akustyka - Pomiary terenowe izolacyjności od dźwięków powietrznych i uderzeniowych oraz hałasu od urządzeń wyposażenia technicznego - Metoda uproszczona
11. PN-B-02151-2:2018-01 Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 2: Wymagania dotyczące dopuszczalnego poziomu dźwięku w pomieszczeniach
12. PN-B-02156:1987 Akustyka budowlana - Metody pomiaru poziomu dźwięku A w budynkach
13. PN-B-02151-02:1987 Akustyka budowlana - Ochrona przed hałasem pomieszczeń w budynkach -- Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach

BADANIA URZĄDZEŃ GRZEWczyCH NA PALIWA STAŁE.

DZIAŁANIA ZMIERZAJĄCE
DO POPRAWY JAKOŚCI POWIETRZA



MGR INŻ. MICHAŁ SKRZYPCZAK

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



CLDT



Od 1 stycznia 2020 r. w krajach Unii Europejskiej zaczęło obowiązywać rozporządzenie Komisji (UE) 2015/1189 wprowadzające dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE, tzw. dyrektywę ekoprojektu. Wspomniane rozporządzenie wprowadziło wymagania w zakresie emisji i efektywności energetycznej kotłów na paliwa stałe.

Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego (CLDT) od wielu lat przeprowadza badania kotłów na paliwa stałe, oferując certyfikację wyrobów na zgodność z normą PN-EN 303-5 [1] zharmonizowaną z dyrektywą 2006/42/WE oraz rozporządzeniami [6] i [10]. Wykonywane są także ekspertyzy techniczne w zakresie efektywności energetycznej i emisji spalin [2].



Certyfikat Akredytacji nr AB 001

CLDT jest pierwszym w Polsce akredytowanym laboratorium badawczym [3].

Podczas każdego sezonu grzewczego pojawia się smog, który odczuwamy na własnej skórze, w płucach i oczach. Najbardziej niebezpieczną częścią smogu są pyły zawieszane PM10 i PM2,5. Niewielkich rozmiarów cząstki pyłu PM10 dostają się do górnych dróg oddechowych, a szczególnie groźny jest pył PM2,5 który przez pęcherzyki płucne trafia do krwiobiegu.

Rosnące oczekiwania społeczne w zakresie ograniczania emisyjności i wzrostu efektywności energetycznej urządzeń grzewczych na paliwa stałe powodują ciągły wzrost wymagań norm europejskich w stosunku do tego typu urządzeń.

W Polsce największy problem stanowi ogrzewanie domów w sezonie grzewczym. Znaczna liczba gospodarstw domowych wykorzystuje do tego celu stare kotły na paliwa stałe, tzw. kopciuchy. Spalane są w nich paliwa o niskiej jakości, często nawet odpady komunalne.

Zła jakość powietrza wynika z wielu czynników, tj.: źródła energii wykorzystywane do ogrzewania gospodarstw domowych, stosowane środki transportu, ukształtowanie terenu, aktualne warunki atmosferyczne. W celu zmniejszenia stężenia zanieczyszczeń zawartych w atmosferze kraje Unii Europejskiej podejmują szereg działań, np. wprowadzanie norm jakości spalin dla pojazdów użytkowych.

Działania, które mogą poprawić sytuację, dotyczą dwóch obszarów:

- poprawa jakości produktów dostępnych na rynku paliw stałych;
- zwiększenie wymagań stawianych kotłom na paliwa stałe w zakresie ich emisji i efektywności energetycznej.

WYMAGANIA DLA PALIW

W dniu 31 grudnia 2022 r. weszło w życie rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 23 grudnia 2022 r. w sprawie wymagań jakościowych dla paliw stałych (Dz.U. 2022 poz. 2856) [4]. Jest to rozporządzenie uchylające rozporządzenie [5].

Zmiany w rozporządzeniu [4] dotyczą paliw stosowanych do kotłów grzewczych na paliwa stałe. Jedną z grup jakościowych węgla kamiennego, zgodnie z rozporządzeniem [5], określaną była jako ekogroszek. Taka nazwa mogła sugerować, że jest to paliwo ekologiczne. W rozporządzeniu [4] zastosowano nowe określenie – groszek plus.

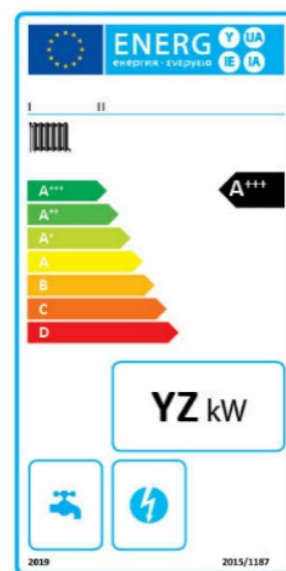
Parametry węgla kamiennego (także brykiety i pelety) o nazwie „groszek plus” odpowiadają parametrom węgla kamiennego o nazwie ekogroszek. W chwili obecnej dla węgla kamiennego o wymiarze ziarna 5÷31,5 mm o nazwie groszek plus maksymalna zawartość popiołu wynosi 12%, maksymalna zawartość siarki całkowitej – 1,2%, minimalna wartość opałowa – 24 MJ/kg, maksymalna zawartość wilgoci całkowitej – 15%.

W rozporządzeniu [4] wprowadzono nową grupę jakościową dla węgla kamiennego, określoną jako groszek premium. Jest to paliwo stałe o wymiarze ziarna 5÷31,5 mm, którego wyższe parametry mają wpłynąć na lepsze spalanie i ograniczenie emisji spalin. Parametry węgla kamiennego kwalifikowanego jako groszek premium określają maksymalną zawartość popiołu na 7%, maksymalną zawartość siarki całkowitej – 0,8%, minimalną wartość opałową – 25 MJ/kg, a maksymalną zawartość wilgoci całkowitej – 11%.

Paliwa wskazane w rozporządzeniu [4] jako groszek plus i groszek premium spełniają wymagania jakościowe dla paliw przeznaczonych dla kotłów 5 klasy energetycznej wskazanych w normie PN-EN 303-5 [1].

WYMAGANIA DLA KOTŁÓW

Zwiększanie wymagań stawianych kotłom trwa od kilku lat. Od 1 kwietnia 2017 r. dostawcy wprowadzający do obrotu lub użytkowania kotły na paliwa stałe zostali zobowiązani rozporządzeniem delegowanym Komisji (UE) 2015/1187 [6] do oznaczania tych wyrobów etykietą dotyczącą klasyfikacji efektywności energetycznej; dotyczy to tylko groszku premium (wg załącznika rozporządzenia).



Rys. 2. Załącznik III [6] etykieta 2

Etykieta dotyczy wartości współczynnika efektywności energetycznej EEI (ang. Energy Efficiency Index). To oznakowanie jest dobrze znane ze sprzętów AGD, takich jak kuchenki gazowe czy lodówki.

Tabela 1. Klasy efektywności energetycznej kotłów na paliwo stałe (tabela 1, załącznik II [6])

Klasa efektywności energetycznej	Współczynnik efektywności energetycznej EEI
A+++	$EEI \geq 150$
A++	$125 \leq EEI < 150$
A+	$98 \leq EEI < 125$
A	$90 \leq EEI < 98$
B	$82 \leq EEI < 90$
C	$75 \leq EEI < 82$
D	$36 \leq EEI < 75$
E	$34 \leq EEI < 36$
F	$30 \leq EEI < 34$
G	$EEI < 30$

Od roku 2019 wytwórcy wprowadzając urządzenia na rynek, muszą deklarować efektywność energetyczną w zakresie od A do D (klasa A+++)

Oznakowanie EEI może ułatwić potencjalnym klientom świadomą decyzję przy zakupie kotła. Wybierając kocioł o wyższej efektywności energetycznej, użytkownik z pewnością przyczynia się do ochrony środowiska.



PRZEPISY KRAJOWE

W Polsce obowiązuje obecnie rozporządzenie Ministra Rozwoju i Finansów z dnia 1 sierpnia 2017 r. w sprawie wymagań dla kotłów na paliwo stałe [7] wraz z późniejszymi zmianami [8], [9]. Rozporządzenie określa wymagania dla wprowadzanych do obrotu i użytkowanych kotłów na paliwo stałe o znamionowej mocy cieplnej nie większej niż 500 kW, w tym kotłów wchodzących w skład zestawów zawierających kocioł na paliwo stałe, ogrzewacze dodatkowe, regulatory temperatury i urządzenia słoneczne.

Rozporządzenie [7] wskazuje normę [1] wprost w kilku zapisach.

- Potwierdzenie spełniania granicznych wartości sprawności cieplnej kotłów jest dokonywane przy uwzględnieniu normy [1].
- Kotły z ręcznym sposobem zasilania paliwem stałym powinny być eksploatowane ze zbiornikiem akumulacyjnym, którego minimalna bezpieczna pojemność jest określona zgodnie z normą [1].

Zgodnie z rozporządzeniami [7], [8] i [9] ograniczona została możliwość wprowadzania do obrotu kotłów innych niż klasy 5 posiadających parametry wynikające z normy [1].

W kotłach z automatycznym sposobem zasilania paliwem zakazuje się stosowania elementu konstrukcyjnego pozwalającego na stosowanie ruszta awaryjnego.

PRZEPISY UNIJNE

Komisja Europejska przyjęła rozporządzenie 2015/1189 wprowadzające tzw. dyrektywę ekoprojektu [10]. Określono w nim wymogi i harmonogram dotyczący ekoprojektu dla kotłów na paliwo stałe. Od dnia 1 stycznia 2020 r. kotły na paliwo stałe oraz informacja o tym produkcie muszą spełniać wymogi określone w rozporządzeniu.

DYREKTYWA EKOPROJEKTU WPROWADZIŁA WYMAGANIA W ZAKRESIE EMISJI I EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ KOTŁÓW NA PALIWO STAŁE. ROZPORZĄDZENIE OBEJMUJE NASTĘPUJĄCE WYMAGANIA:

- sezonowa efektywność energetyczna ogrzewania pomieszczeń dla kotłów o nominalnej mocy cieplnej 20 kW lub mniejszej nie może być mniejsza niż 75%,
- sezonowa efektywność energetyczna ogrzewania pomieszczeń dla kotłów o znamionowej mocy cieplnej przekraczającej 20 kW nie może być mniejsza niż 77%,
- emisje cząstek stałych dotyczące sezonowego ogrzewania pomieszczeń nie mogą przekraczać 40 mg/m³ w przypadku kotłów z automatycznym podawaniem paliwa oraz 60 mg/m³ w przypadku kotłów z ręcznym podawaniem paliwa,
- emisje organicznych związków gazowych dotyczące sezonowego ogrzewania pomieszczeń nie mogą przekraczać 20 mg/m³ w przypadku kotłów z automatycznym podawaniem paliwa oraz 30 mg/m³ w przypadku kotłów z ręcznym podawaniem paliwa,
- emisje tlenku węgla dotyczące sezonowego ogrzewania pomieszczeń nie mogą przekraczać 500 mg/m³ w przypadku kotłów z automatycznym podawaniem paliwa oraz 700 mg/m³ w przypadku kotłów z ręcznym podawaniem paliwa,
- emisje tlenków azotu, wyrażone jako ekwiwalent dwutlenku azotu, dotyczące sezonowego ogrzewania pomieszczeń nie mogą przekraczać 200 mg/m³ w przypadku kotłów na biomasę oraz 350 mg/m³ w przypadku kotłów na paliwa kopalne.



Punkty a) i b) SEZONOWA EFEKTYWNOŚĆ

Kotły rzadko eksploatowane są z mocą nominalną. Znacznie częściej wykorzystywana jest ich moc pośrednia lub minimalna. Sezonowość efektywności energetycznej oraz emisji spalin jest uwzględniana w sposobie obliczania tych efektywności dla trybu aktywnego.

Sezonową efektywność energetyczną ogrzewania pomieszczeń przez kotły dla trybu aktywnego oblicza się jako średnią ważoną sprawności użytkowej przy mocy nominalnej i minimalnej. Waga sprawności przy mocy minimalnej jest równa 85%, ma więc decydujące znaczenie.

Sezonową efektywność energetyczną dla trybu aktywnego oblicza się w następujący sposób [6, 10]:

$$\eta_{son} = 0,85 \eta_p + 0,15 \eta_n,$$

gdzie:

η_p – sprawność użytkowa przy mocy minimalnej,

η_n – sprawność użytkowa przy mocy nominalnej.

Sezonową efektywność energetyczną η_s oblicza się przez skorygowanie sezonowej efektywności energetycznej dla trybu aktywnego o wskaźniki strat spowodowanych działaniem regulatorów temperatury oraz o negatywny efekt zużycia energii elektrycznej* na potrzeby własne.

* niezbędne jest wykonanie pomiaru parametrów elektrycznych [10] kotła według:

- zużycia energii elektrycznej w trybie czuwania,
- zapotrzebowania na energię elektryczną przy znamionowej mocy cieplnej,
- zapotrzebowania na energię elektryczną przy minimalnej mocy cieplnej.

Punkty c)–f) EMISJE

Dla emisji spalin przyjęto podobny sposób obliczeń [6, 10] jak dla ww. efektywności.

$$E_s = 0,85 E_{s,p} + 0,15 E_{s,n},$$

gdzie:

$E_{s,p}$ – emisja spalin przy mocy minimalnej,

$E_{s,n}$ – emisja spalin przy mocy nominalnej.

Producenci kotłów grzewczych na paliwa stałe oraz laboratoria badawcze stosują się do wymagań zawartych w normie EN 303-5.

W związku z aktualizacją normy EN 303-5 wytwórcy wprowadzając kotły na rynek, mogli deklarować spełnienie wymagań, powołując się na normę PN-EN 303-5:2012 tylko do 11.10.2023 r. Po tej dacie właściwą normą jest norma PN-EN 303-5:2021-09. Zostanie ona wycofana 02.02.2025 r. Jednocześnie do tej daty można deklarować

spełnienie wymagań wg normy PN-EN 303-5:2021-09 oraz PN-EN 303-5+A1:2023-05. Po 2025 r. stosowana będzie jedynie wersja normy z 2023 r.

- Norma PN-EN 303-5:2021-09 wprowadza szereg wymagań, które nie były uwzględnione w normie PN-EN 303-5:2012. Podstawową różnicą jest zharmonizowanie nowej edycji normy również z rozporządzeniami [6] i [10]. Zmiany wiążą się z koniecznością wykonania dodatkowych badań.
- Norma PN-EN 303-5:2012 wymagała określenia klasy kotła. W tym celu należało dokonać pomiaru:
 - emisji dla mocy nominalnej w zakresie CO, OGC, pyłu,
 - emisji dla mocy minimalnej w zakresie CO i OGC,
 - efektywności energetycznej dla mocy nominalnej.

Zgodnie z normą PN-EN 303-5:2021-09, oprócz określenia klasy kotła, należy przedstawić sezonową emisję spalin oraz sezonową efektywność energetyczną i współczynnik efektywności energetycznej (EEI). Dla określenia tych parametrów niezbędne jest wykonanie pomiarów zarówno dla mocy nominalnej, jak i dla mocy minimalnej. Pomiarów wykonanych tylko w zakresie normy PN-EN 303-5:2012 są niewystarczające ze względu na brak pomiarów pyłu dla mocy minimalnej oraz efektywności energetycznej dla mocy minimalnej.

Norma PN-EN 303-5:2012 nie wymagała pomiaru emisji spalin w zakresie NO_x, a jedynie zalecała ich wykonanie bez wskazania wartości parametrów granicznych. Wymaganie to zostało zapisane w normie PN-EN 303-5:2021-09, w której to podano wartości kryterialne wg [10]. Nowa edycja normy dla paliw biomasowych drzewnych uwzględnia wartość azotu w paliwie, co wpływa na końcowy wynik średniej wartości emisji NO_x.

Norma PN-EN 303-5:2021-09 rozszerza zakres normy o kotły kondensacyjne. W związku z tym wprowadzono wymagania dotyczące temperatury wody wejściowej i wyjściowej podczas badań dla kotłów kondensacyjnych.

W 2023 r. została opublikowana następna aktualizacja PN-EN 303-5+A1:2023-05. Zawiera ona jedynie aneks H wpro wadzający odchylenie typu A dotyczące Zjednoczonego Królestwa. Jest to powrót do odchylenia wprowadzonego w normie PN-EN 303-5:2012.

Producent powinien deklarować zgodność produkowanych urządzeń po 11 października 2023 r. w odniesieniu do normy EN 303-5:2021, po analizie wymagań normy i przeprowadzeniu oceny zgodności z jej wymaganiami.

Urządzenia wyprodukowane, zaprojektowane, wdrożone do produkcji, poddane badaniom opisanym w normie EN 303-5:2012 oraz zgodne z obowiązującymi rozporządzeniami [6] i [10] o tych samych zakresach emisji i efektywności energetycznej, jakie określa norma EN 303-5:2021, mogą być dalej produkowane i wprowadzane do obrotu bez konieczności wykonywania nowych badań. Warunkiem jest, aby badania potwierdzające spełnienie wymagań określonych w ww. rozporządzeniach zostały wykonane przez podmioty akredytowane we właściwym zakresie.

Urząd Dozoru Technicznego bierze udział w badaniach kotłów na paliwa stałe od wielu lat. Początkowo działania te prowadzone były w ramach procesów certyfikacji wyrobów mających na celu potwierdzenie zgod-

ności z normą PN-EN 303-5. Obecnie przeprowadzane są także ekspertyzy techniczne, które pozwalają na określenie klasy kotła, klasy efektywności energetycznej i spełnienie wymagań dyrektywy ekoprojektu.

UDT CLDT posiada certyfikat akredytacji nr AB 001. W zakresie akredytacji znajdują się badania wykonywane zgodnie z normami:

- PN-EN 303-5:2012
- EN 303-5:2021
- PN-EN 303-5:2021-09
- PN-EN 303-5+A 1:2023-05

Pozwala to spełnić szeroki zakres oczekiwań wytwórców przy wprowadzaniu nowych projektów na rynek, ale też wykonać badania już wprowadzonych na rynek kotłów np. dla Inspekcji Handlowej.



Rys. 2. Badanie w zakresie emisji spalin i efektywności energetycznej (PN-EN 303-5:2023) prowadzone w laboratorium UDT w CLDT w Poznaniu



Jednostka certyfikująca wyroby UDT-CERT prowadzi certyfikacje kotłów na paliwa stałe na zgodność z normą PN-EN 303-5:2023, a badania w tych procesach wykonuje CLDT. Na podstawie wyników badań i otrzymanych certyfikatów wytwórcy kotłów na paliwa stałe mogą dokonać oceny zgodności z wymaganiami dyrektywy maszynowej 2006/42/WE i wystawić deklarację zgodności WE. Badania wykonywane są u wytwórcy lub w CLDT po wcześniejszym uzgodnieniu. Zakres akredytacji laboratorium obejmuje badania konstrukcyjne i ciepłno-techniczne kotłów grzewczych.

● **BEZPIECZEŃSTWO UŻYTKOWANIA:**

- ciśnienie (0–15) bar
- masa (0–3000) kg
- temperatura (0–450)°C
- czas (0–12) godz.

● **ZAWARTOŚĆ SUBSTANCJI SZKODLIWYCH W SPALINACH PRZY SPALANIU PALIW STAŁYCH:**

- tlen O₂ (0–21)%
- tlenek węgla CO (0–100 000) ppm
- dwutlenek węgla CO₂ (0–20)%
- tlenki azotu NO, NO₂, (NOX) (0–4000) ppm
- współczynnik nadmiaru powietrza do spalania λ (wartość wyliczana)
- pył (0–200) mg/m³
- niespalone gazowe substancje organiczne – węgiel organiczny związany (0–2000) ppm

● **SPRAWNOŚĆ CIEPLNA URZĄDZEŃ OPALANYCH PALIWAMI STAŁYMI**



POBIERZ



Zakres akredytacji
laboratorium badawczego
NR AB 001

Literatura:

1. EN 303-5 Kotły grzewcze. Część 5: Kotły grzewcze na paliwa stałe z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa o mocy nominalnej do 500 kW – Terminologia, wymagania, badania i oznakowanie
2. <https://www.udt.gov.pl/laboratorium-badawcze-ab-001/metoda-badan/2015-11-10-12-13-01/badania-kotlow-na-paliwa-stale>
3. <https://www.pca.gov.pl/akredytowane-podmioty/akredytacje-aktywne/laboratoria-badawcze/AB%20001,podmiot.html>
4. Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 23 grudnia 2022 r. w sprawie wymagań jakościowych dla paliw stałych (Dz.U. 2022 poz. 2856) <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20220002856/O/D20222856.pdf>
5. Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 27 września 2018 r. w sprawie wymagań jakościowych dla paliw stałych (Dz.U. 2018 poz. 1890) <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20180001890/O/D20181890.pdf>
6. ROZPORZĄDZENIE DELEGOWANE KOMISJI (UE) 2015/1187 z dnia 27 kwietnia 2015 r. uzupełniające dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/30/UE w odniesieniu do etykiet efektywności energetycznej dla kotłów na paliwo stałe i zestawów zawierających kocioł na paliwo stałe, ogrzewacze dodatkowe, regulatory temperatury i urządzenia słowneczne <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R1187&from=SK>
7. Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Finansów z dnia 1 sierpnia 2017 r. w sprawie wymagań dla kotłów na paliwo stałe (Dz.U. 2017 poz. 1690) <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20170001690/O/D20171690.pdf>
8. Rozporządzenie Ministra Przedsiębiorczości i Technologii z dnia 21 lutego 2019 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie wymagań dla kotłów na paliwo stałe (Dz.U. 2019 poz. 363) <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20190000363/O/D20190363.pdf>
9. Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 30 grudnia 2019 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie wymagań dla kotłów na paliwo stałe (Dz.U. 2019 poz. 2549) <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20190002549/O/D20192549.pdf>
10. ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (UE) 2015/1189 z dnia 28 kwietnia 2015 r. w sprawie wykonania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla kotłów na paliwo stałe <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R1189&from=PL>
11. Wykazy norm zharmonizowanych z dyrektywami nowego podejścia - 2006/42/WE (MD dotycząca maszyn) https://www.pkn.pl/sites/default/files/sites/default/files/imce/files/dyrektywy/2006_42_WE.pdf

BEZPIECZNA I EFEKTYWNA EKSPLOATACJA KOTŁÓW WODNYCH I PAROWYCH

Woda i problemy z nią związane



DR KATARZYNA MAKOWSKA

Starszy Specjalista ds. Badań Chemicznych
Dział Badań Laboratoryjnych w Poznaniu
Urząd Dozoru Technicznego



MGR INŻ. HALINA GABRYELEWICZ

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

Ciągły rozwój aglomeracji miejskich, a także przemysłu, w tym energetyki, powodują, że zapotrzebowanie na wodę nieustannie wzrasta. Zarówno energetyka zawodowa, jak i przemysłowa wykorzystują duże ilości wody, wymagając przy tym jej bardzo wysokiej czystości. Woda zasilająca wszelkie urządzenia techniczne musi zapewniać bezawaryjną oraz ekonomicznie uzasadnioną pracę tych urządzeń. Stały postęp technologiczny w dziedzinie rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń grzewczych oraz zwiększające się zapotrzebowanie dotyczące ilości oraz jakości wyprodukowanej pary powodują coraz wyższe wymagania związane z jakością wody zasilającej te urządzenia.

Stężenie zanieczyszczeń w wodzie zasilającej urządzenia techniczne powinno być ustalone na takim poziomie, by zapewnić:

- wytwarzanie dostatecznie czystej pary,
- ograniczenie do minimum postępu korozji elementów konstrukcyjnych,
- właściwą czystość wewnętrznych powierzchni ogrzewalnych,
- zmniejszenie do minimum strat wody i ciepła wynikających z odsalania i odmulania [1].

WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOCHEMICZNE WODY [2]

Woda w przyrodzie nie występuje w postaci czystego związku tlenu z wodorem. Zawiera wiele różnych substancji w postaci zawiesin lub w formie rozpuszczonej. Substancje te określane są jako zanieczyszczenia. To właśnie ich obecność decyduje o przydatności wody do konkretnych celów.

Do najważniejszych właściwości fizycznych wody należą:

- a) **MĘTNOŚĆ** – spowodowana zawartością zawiesin takich jak glina, il, wodorotlenki żelaza, związki humusowe itp.,
- b) **BARWA** – wody naturalne mają różne zabarwienie uzależnione od zanieczyszczeń w niej rozpuszczonych, najczęściej są nimi związki manganu i żelaza oraz związki humusowe,
- c) **ZAPACH** – może być wywołany obecnością lotnych związków organicznych, gazów, produktów rozkładu substancji organicznych, ścieków bytowo-gospodarczych i przemysłowych,
- d) **SMAK** – zależy przede wszystkim od rodzaju i stężenia rozpuszczonych w niej soli i gazów, ma znaczenie tylko w przypadku wód przeznaczonych do spożycia,
- e) **TEMPERATURA** – ma znaczenie w odniesieniu do wód przemysłowych stosowanych w procesach chłodzenia.

W przypadku wody przeznaczonej do celów przemysłowych dużo ważniejszymi właściwościami są jej parametry chemiczne. Wiele awarii kotłów spowodowanych jest niewłaściwą jakością wody zasilającej. Podstawowymi wskaźnikami, które należy kontrolować, są:

- a) **ODCZYN WODY** – przedstawiany jest za pomocą wykładnika wodowego pH. To jeden z najważniejszych parametrów określających jakość wody. Opisuje stopień jej kwasowości lub zasadowości. Woda kotłowa musi być zasadowa – jej pH musi być wyższe od 7.
- b) **TWARDOŚĆ** – spowodowana obecnością rozpuszczonych w niej soli. Wyróżniamy trzy rodzaje twardości:
 - węglanową wywołaną obecnością w wodzie węglanów oraz wodorotlenków wapnia i magnezu, a także węglanów obojętnych,
 - niewęglanową, którą powodują obecne w wodzie siarczany, chlorki oraz krzemiany wapnia i magnezu,
 - całkowitą będącą sumą dwóch powyższych twardości;



Rys. 1. Osad zalegający w rurach ekranowych kotła parowego

- c) **ZASADOWOŚĆ** – określa zawartość w wodzie wodorotlenków, węglanów kwaśnych oraz węglanów sodu, potasu, magnezu oraz wapnia;
- d) **UTLENIALNOŚĆ** – definiuje stopień zanieczyszczenia wody substancjami organicznymi i nieorganicznymi, takimi jak: siarkowodor, siarczany (IV), azotany (III) czy związki żelaza, utleniającymi się za pomocą nadmanganianu potasu. Obecność w wodzie tych substancji zwiększa jej działanie korozyjne na beton oraz metal;
- e) **SUCHA POZOSTAŁOŚĆ** – wskaźnik zanieczyszczenia wody substancjami stałymi, zawieszonymi lub rozpuszczonymi w wodzie;
- f) **STRATA PRZY PRAŻENIU** – jest umownym wskaźnikiem zawartości substancji organicznych w wodzie;
- g) **ZAWARTOŚĆ ZWIĄZKÓW AZOTU** – obecność tych związków świadczy o zanieczyszczeniu wody ściekami. Może wskazywać także na wymywanie z gleby nawozów azotowych stosowanych w rolnictwie. Związki azotowe działają korrozyjnie na miedź i cynk oraz ich stopy;
- h) **ZAWARTOŚĆ CHLORKÓW** – jony chlorkowe są obecne we wszystkich wodach naturalnych w stężeniach zależnych od pochodzenia geologicznego i geograficznego. Wysokie stężenie chlorków może wywoływać niekorzystne skutki dla betonu czy stali. Chlorki wapnia i magnezu nadają wodzie twardość niewęglanową;
- i) **ZAWARTOŚĆ SIARCZANÓW** – pojawiają się w wodzie w wyniku wymywania skał osadowych, wylugowania gleby i na skutek utleniania siarczków i siarki. Wykazują działanie korodujące na beton oraz konstrukcje żelbetowe. Nadają wodzie twardość niewęglanową;
- h) **ZAWARTOŚĆ ZWIĄZKÓW MANGANU** – występują w wodach naturalnych zwykle obok większych ilości żelaza. Pochodzą z resztek roślinnych, z gleby oraz z zanieczyszczeń, przede wszystkim przemysłowych. Jest ich przeważnie mniej niż żelaza, jednak są znacznie trudniejsze do usunięcia i dużo bardziej szkodliwe;
- i) **ZAWARTOŚĆ ZWIĄZKÓW ŻELAZA** – w wodzie surowej żelazo występuje w postaci rozpuszczonej. W takiej formie jest ono praktycznie niezauważalne – woda sprawia wrażenie klarownej. Żelazo pod wpływem utlenienia bardzo łatwo wytrąca się z wody, tworząc osad. Duże ilości związków żelaza nadają wodzie specyficzny zapach oraz posmak. Ponadto w odłożonych osadach rozwijają się najróżniejsze bakterie, które mogą wtórnie zanieczyszczać wodę;
- k) **ZAWARTOŚĆ ZWIĄZKÓW KRZEMU** – obecność krzemionki w wodzie kotłowej jest bardzo niepożądana. Dla kotłów pracujących przy ciśnieniu powyżej 4 MPa krzemionka zaczyna się rozpuszczać w parze, a jej rozpuszczalność bardzo szybko wzrasta wraz ze wzrostem ciśnienia. Sole osadzają się na ściankach kotła w postaci twardego kamienia, który charakteryzuje się małą przewodnością cieplną. W wyniku nagromadzenia się tego rodzaju kamienia kotłowego ścianki urządzenia przegrzewają się i w krótkim czasie ulegają uszkodzeniu [3];
- i) **ZAWARTOŚĆ TLENU** – parametr ten oznaczany jest ze względu na korodujące działanie tlenu na elementy konstrukcyjne urządzeń technicznych;
- m) **ZAWARTOŚĆ DWUTLENKU WĘGLA** – występuje w wodzie jako wolny oraz związany w kwaśnych i obojętnych węglanach magnezu i wapnia. O korozyjności wody decyduje ilość agresywnego dwutlenku węgla.

WYMAGANIA DOTYCZĄCE JAKOŚCI WODY KOTŁOWEJ

Dopuszczalne parametry wody przeznaczonej do układów kotłowych i grzewczych, a także sposoby ochrony instalacji określa dokumentacja techniczna przygotowywana najczęściej przez producenta urządzenia. Producent często odwołuje się do wymagań określonych w normach:

1. PN-C-04601:1985 – Woda do celów energetycznych – Wymagania i badania jakości wody dla kotłów wodnych i zamkniętych obiegów ciepłowniczych [4].
2. PN-C-04607:1993 – Woda w instalacjach ogrzewania – Wymagania i badania dotyczące jakości wody [5].
3. PN-EN 12952-12:2006 – Kotły wodnorurowe i urządzenia pomocnicze – Część 12: Wymagania dotyczące jakości wody zasilającej i wody kotłowej [6].

W tabeli 1 przedstawiono przykładowe wymagania dla wody obiegowej oraz dla wody służącej do napełniania i uzupełniania obiegów zgodnie z normą PN-C-04601:1985.

Tabela 1. Wymagania dla wód obiegów, w których ilość wody uzupełniającej przekracza 5 m³/h [4]

Rodzaj oznaczenia	Jednostka	Woda	
		obiegowa	do napełniania i uzupełniania obiegów
Wartość pH	-	9–10 (8,5–9,2) ¹⁾	≥ 8,5 tak, aby był zachowany zakres pH wody obiegowej
Twardość ogólna	mval/l	≤ 0,02 ²⁾	≤ 0,02
Zasadowość ogólna (Z _{og})	mval/l	≤ 1,4	≤ 1,0
Tlen rozpuszczony (O ₂)	mg/l	≤ 0,05	≤ 0,03
Siarczany (IV) (SO ₃ ²⁻)	mg/l	3–5	(30–50) ³⁾ ≥ 3 tak, aby był zachowany zakres siarczynów w wodzie obiegowej
Żelazo ogólne (Fe ³⁺ , Fe ²⁺)	mg/l	≤ 0,1	≤ 0,05
Zawiesina ogólna	mg/l	≤ 5	
Fosforany (V) (PO ₄ ³⁻)	mg/l	5–15	tak, aby zachować wartości w wodzie obiegowej
Substancje ekstrahujące się rozpuszczalnikami organicznymi	mg/l	≤ 1	
Inhibitory	mg/l	wg indywidualnych ustaleń	

Uwagi:
¹⁾ Wartości w nawiasie odnoszą się do obiegów z wymiennikami ciepła o rurkach mosiężnych lub miedzianych.
²⁾ Dla eksploatacji ciągłej. Dopuszcza się wartość ≤ 0,035 mval/l w sytuacjach awaryjnych do 24 h. Pomiar prowadzić w kolektorach wody powrotnej.
³⁾ Wartości w nawiasie odnoszą się tylko do wody do napełniania oraz konserwacji obiegu w czasie postoju.

SPOSOBY USUWANIA ZANIECZYSZCZEŃ Z WODY [7]

Nowoczesne kotły charakteryzują się wysokim obciążeniem cieplnym, dlatego należy tak przygotować wodę zasilającą, aby nie narażać stalowej powierzchni kotła na korozję oraz na powstawanie kamienia kotłowego.

Woda zasilająca kocioł musi zostać przed wprowadzeniem do kotła odgazowana.

Należy usunąć rozpuszczony w niej tlen i dwutlenek węgla. Są to gazy oddziałujące korozyjnie na elementy konstrukcyjne kotłów. Usuwanie ich następuje w odgazowywaczu termicznym podgrzewanym parą z obiegu kotłowego. Jest to najtańsza, a także najskuteczniejsza metoda usuwania gazów z wody wszędzie tam, gdzie dysponuje się parą grzewczą. Do podstawowych zadań termicznego odgazowania wody zasilającej kotły parowe zalicza się usuwanie tlenu i dwutlenku węgla, a także procesów korozyjnych.



Rys. 2. Osad zalegający w rurze kotła wodno-rurowego

Oprócz odgazowania wody należy jeszcze dobrać odpowiednią metodę usuwania z wody zanieczyszczeń.

W praktyce najczęściej spotykanymi technologiami uzdatniania wody uzupełniającej są te wymienione poniżej.

1. Zmiękczenie wody na złożu jonowymiennym silnie kwaśnego kationitu regenerowanego chlorkiem sodu

W tym przypadku usuwana jest jednocześnie twardość węglanowa oraz stała wody i następuje usunięcie z wody kationów osadotwórczych. Kationy te zastępowane są jonami sodowymi charakteryzującymi się wysoką rozpuszczalnością, gwarantując tym samym zahamowanie procesów wytrącania się osadów z wody w kotle. Zmiękczenie wody prowadzi do jej alkalizacji w kotle, lecz także do wzrostu jej zasolenia, co powoduje straty wody i energii cieplnej w procesie odsalania. Ponadto proces ten nie powoduje zmniejszenia przewodnictwa wody.

2. Demineralizacja wody w instalacji membranowej odwróconej osmozy

Proces ten prowadzony jest na spiralnych modułach membranowych odwróconej osmozy. Polega na wysokociśnieniowej filtracji rozpuszczonych soli i zawiesin pochodzenia nieorganicznego i organicznego zawartych w wodzie przez cienką przegrodę półprzepuszczalnej membrany odwróconej osmozy. W rezultacie przez membranę przechodzi czysta woda, a sole i związki organiczne pozostają przed nią. W celu wydłużenia żywotności membran zaleca się wstępne przygotowanie wody.

3. Dekarbonizacja wody najpierw na złożu słabo kwaśnego kationitu, regenerowanego kwasem solnym lub siarkowym, desorpcja CO₂, końcowe zmiękczenie wody w złożu silnie kwaśnego kationitu

Polega na szeregowej wymianie wodorowo-sodowej. W wyniku łącznego procesu dekarbonizacji i desorpcji CO₂ uzyskuje się wodę o zmniejszonym przewodnictwie, pozbawioną dodatkowo twardości węglanowej. Jednak aby usunąć niską twardość niewęglanową, wymagane jest zmiękczenie wody w tradycyjnych zmiękczaczach. Tak przygotowana woda nie powoduje wzrostu odczynu pH wody kotłowej. Dekarbonizacja wody jest coraz rzadziej stosowana w przemyśle. Wypierana jest przez instalacje odwróconej osmozy, które są nowocześniejsze, niejednokrotnie tańsze, a także nie wymagają użycia agresywnego kwasu solnego.

Woda powinna być również kondycjonowana z użyciem środków chemicznych.

Dzięki korekcji wody tymi środkami uzyskuje się:

- związanie resztkowego tlenu,
 - redukcję korozyjności poprzez uzyskanie odpowiedniego zakresu odczynu pH wody,
 - stabilizację resztkowej twardości,
 - przeciwdziałanie odkładaniu się osadów kamienia kotłowego.
- Środki chemiczne używane do kondycjonowania wody kotłowej można podzielić na pięć podstawowych kategorii:
- środki alkalizujące – podnoszą odczyn pH wody,
 - odtleniacze – usuwają z wody tlen szczytkowy na drodze reakcji chemicznej,
 - stabilizatory twardości i antyskalanty – zapobiegają wypadaniu i osadzeniu trudno rozpuszczalnych soli na powierzchniach wymiany ciepła i elementach konstrukcyjnych,
 - inhibitory korozji – spowalniają lub hamują procesy korozyjne w środowisku wodnym,
 - środki dyspergujące – przeciwdziałają wzrostowi i osadzeniu się cząstek stałych obecnych w wodzie.

By mieć pewność, że do kotła trafia woda o odpowiednich parametrach, należy przeprowadzać regularnie jej analizę fizykochemiczną. W tabeli 2 przedstawiono przykładowe wyniki analizy wody.



Rys. 3. Osady pochodzące z kotłów wodnych i parowych

Tabela 2. Analiza fizykochemiczna wody uzupełniającej dla kotła wodnego

Lp.	Badana wielkość	Jednostka	Wyniki analizy	Niepewność
1	pH	-	7,8	± 0,2
2	Przewodność elektryczna właściwa	µS/cm	628	± 11
3	Zasadowość złożona (AP)	mmol/l	< 0,4*	nd
4	Zasadowość ogólna (AT)	mmol/l	1,32	± 0,10
5	Sucha pozostałość	mg/dm ³	393	± 39
6	Pozostałość po prażeniu	mg/dm ³	237	± 24
7	Strata prażenia	mg/dm ³	156	± 16
8	Indeks nadmanganianowy	mgO ₂ /dm ³	2,06	± 0,20
9	Tlen rozpuszczony	mg/dm ³	2,63	± 0,22
10	Wolny dwutlenek węgla	mg/dm ³	17,6	± 1,6
11	Twardość całkowita	mmol/l	3,20	± 0,18
		mval/dm ³	6,40	± 0,36
		°n	17,9	± 2,0
12	Twardość wapniowa	mmol/l	2,65	± 0,14
		mval/dm ³	5,30	± 0,28
		°n	14,9	± 1,6
13	Twardość magnezowa	mmol/dm ³	0,55	± 0,03
		mval/dm ³	1,10	± 0,05
		on	3,1	± 0,2
14	Wapń	mg/dm ³	106	± 5,1
15	Magnez	mg/dm ³	13,3	± 0,7
16	Żelazo całkowite	mg/dm ³	0,015	± 0,002
17	Mangan	mg/dm ³	<0,1*	nd
18	Sód	mg/dm ³	20,3	± 0,5
19	Potas	mg/dm ³	2,3	± 0,1
20	Siarczany	mg/dm ³	<10*	nd
21	Krzemiany	mg/dm ³	21,7	± 0,6
22	Fosforany	mg/dm ³	<0,1*	nd
23	Chlorki	mg/dm ³	5,6	± 0,3

* – wartość poniżej granicy oznaczenia ilościowego
nd – dla wartości poniżej granicy oznaczenia ilościowego niepewności nie podaje się

Znając najważniejsze parametry fizykochemiczne wody, we współpracy ze specjalistami można dobrać odpowiednią metodę jej oczyszczania.

KAMIEŃ KOTŁOWY

Wynikiem użytkowania kotłów, w tym kotłów parowych i wodnych, do których doprowadzana jest woda zawierająca zanieczyszczenia, jest wytrącanie osadów na ściankach po stronie wodnej kotłów.

Najniebezpieczniejsze są osady typu kamienistego, które warstwowo narastając na ściankach, utrudniają przepływ wody oraz pogarszają przewodzenie ciepła. Małe przewodnictwo cieplne (tabela 3) kamienia kotłowego wpływa na wzrost temperatury elementów konstrukcyjnych kotła, powodując ich miejscowe przegrzanie. Taka sytuacja może doprowadzić do poważnej awarii w wyniku pojawiających się pęknięć i wybrzuszeń osłabionych elementów.

Mniej szkodliwe są osady szlamiste oraz muł, które można usunąć poprzez odmulanie. Jednakże zbyt duża ilość tego rodzaju osadów może spowodować ogólne zanieczyszczenie urządzenia oraz stwarza zagrożenie porywania ich przez parę opuszczającą kocioł.

W przemysłowych kotłach parowych rozróżniamy trzy podstawowe rodzaje kamienia kotłowego ze względu na przeważającą zawartość danego składnika [8].

1. KAMIEŃ WĘGLANOWY

Składa się w znacznej mierze z węglanów wapnia i magnezu, ma barwę beżową lub białą.

2. KAMIEŃ SIARCZANOWY

Ma kolor szary, zawiera głównie siarczan (VI) wapnia. Jest twardszy i trudniejszy do usunięcia od kamienia węglanowego, a także charakteryzuje się znacznie gorszym przewodnictwem cieplnym.

3. KAMIEŃ KRZEMIANOWY

W jego skład wchodzi przede wszystkim krzemiany wapnia i magnezu. Powstaje na najbardziej obciążonych termicznie częściach konstrukcyjnych kotła. Jest najtwardszy spośród wszystkich kamieni i stanowi najlepszy izolator.

W kotłach wysokotemperaturowych podgrzewających wodę w instalacjach centralnego ogrzewania wykonanych ze stali kotłowej występuje kamień koloru czarnego. W jego skład wchodzi głównie magnetyt (Fe_2O_3), który powstaje w wyniku reakcji elementów konstrukcyjnych kotła wykonanych ze stali z tlenem rozpuszczonym w wodzie [8].

Tabela 3. Porównanie współczynników przewodności cieplnej różnych materiałów [2]

Material	Przewodność cieplna λ [W/(m ² ·oC)]
Miedź	350
Mosiądz	116
Stal kotłowa	45
Kamień węglanowy	0,6–6
Kamień siarczanowy	2,3
Kamień krzemianowy	0,3
Rdza Fe_2O_3	1,1
Osad z rozpadu termicznego substancji organicznej	0,1

Stosując odpowiednie metody oczyszczania wody, nie można całkowicie uniknąć narastania osadów na powierzchniach kotłów omywanych przez wodę. Jeżeli użytkownik zauważy spadek wydajności kotła oraz wzrost kosztów jego eksploatacji, powinien sprawdzić, czy na ściankach urządzenia nie osadził się kamień kotłowy. Wystarczy już 0,5 mm warstwy kamienia, aby znacznie utrudnić wymianę ciepła. Wówczas należy usunąć kamień z kotła.



Rys. 4. Peknieta rura pochodząca z kotła wodno-rurowego

Najczęściej stosowane są chemiczne metody usuwania kamienia, takie jak niżej wymienione.

1. WYGOTOWANIE FOSFORANOWE

Podczas tego procesu do wody dawkuje się fosforan trójsodowy, który reagując ze składnikami kamienia kotłowego, tworzy fosforany wapnia i magnezu. W wyniku tej reakcji następuje wzrost objętości kamienia, powodując jego rozsadzanie, pęknięcie i złuszczenie. Usuwanie złuszczonego kamienia odbywa się w trakcie odmulania kotła.

2. ROZPUSZCZANIE OSADÓW ZA POMOCĄ KWASÓW

W zależności od składu kamienia kotłowego do rozpuszczania osadów stosowane są najczęściej kwas solny, kwas fluorowodorowy, kwas cytrynowy czy kwas amidosulfonowy. Podczas tego procesu należy zachować szczególną ostrożność ze względu na agresywne oddziaływanie stosowanych kwasów na materiał konstrukcyjny kotła. W celu zahamowania procesów korozyjnych należy podczas procesu chemicznego czyszczenia stosować środki zwane inhibitorami korozji. Są to substancje, które po wprowadzeniu w niewielkiej ilości do środowiska korozyjnego znacznie obniżają szybkość procesów korozyjnych [9]. Popularnymi inhibitorami korozji są urotropina oraz wodne roztwory środków powierzchniowo czynnych wzbogaconych związkami właściwymi do stosowanego kwasu. Czyszczenie najczęściej odbywa się poprzez wypełnienie instalacji odpowiednio dobranym roztworem czyszczącym i cyrkulowaniem bądź kilkakrotnym przetłoczeniem go za pomocą pompy w układzie zamkniętym: zbiornik (w którym przygotowuje się kąpiel czyszcząca) – kocioł – zbiornik.

Jeżeli urządzenie podlega dozorowi Urzędu Dozoru Technicznego, to proces chemicznego czyszczenia może wykonać tylko zakład posiadający uprawnienia UDT w tym zakresie, zgodnie z ustawą o dozorze technicznym [10].

Wykaz zakładów posiadających przedmiotowe uprawnienie znajduje się na stronie internetowej UDT [11]. Użytkownik takiego urządzenia technicznego powinien zgłosić się do zakładu uprawnionego z prośbą o wykonanie chemicznego czyszczenia. Na taki zabieg musi wyrazić zgodę inspektor UDT, na którego terenie zainstalowane jest dane urządzenie. W celu dobrania odpowiedniej kąpeli czyszczącej należy pobrać reprezentatywną próbkę kamienia kotłowego i przeprowadzić jego analizę fizykochemiczną. W tabeli 4 przedstawiono przykładową analizę osadu pobranego z kotła parowego.

Tabela 4. Analiza fizykochemiczna osadu pobranego z kotła parowego

	Rodzaj oznaczenia	Wartość	Niepewność	Jednostka
a)	określenie straty prażenia w 800°C	18,9	± 1,9	%
b)	określenie procentowej ilości części nierozpuszczalnych w HCl 1:1	30,2	± 3,0	%
c)	określenie procentowej zawartości składników osadu:			
	- wapń jako CaO	30,9	± 3,1	%
	- magnez jako MgO	5,9	± 0,6	%
	- glin jako Al ₂ O ₃	< 1,0*	nd	%
	- żelazo całkowite jako Fe ₂ O ₃	4,1	± 0,4	%
	- miedź całkowita jako CuO	< 0,7*	nd	%
	- krzemiany jako SiO ₂	30,1	± 3,0	%
	- węglany jako CO ₂	16,7	± 1,7	%
	- siarczany jako SO ₃	2,3	± 0,2	%
	- fosforany jako P ₂ O ₅	0,85	± 0,09	%
	* – wartość poniżej granicy oznaczenia ilościowego nd – nie dotyczy, dla wartości poniżej granicy oznaczenia ilościowego niepewności nie podaje się			

Kolejnym krokiem jest opracowanie technologii chemicznego czyszczenia przez zakład uprawniony, a następnie przesłanie do UDT celem jej uzgodnienia. Po otrzymaniu sprawozdania z uzgadniania napraw metodami chemicznymi zakład uprawniony może przystąpić do wykonania czyszczenia. Po zakończeniu procesu zakład wystawia poświadczenie wykonania procesu, natomiast użytkownik urzędu musi zgłosić inspektorowi UDT urządzenie do przeprowadzenia doraźnej rewizji wewnętrznej oraz próby ciśnieniowej. Po tych wszystkich zabiegach użytkownik może znów bezpiecznie i bez strat energii eksploatować kocioł. Musi jednak pamiętać, że aby urządzenie pozostawało sprawne jak najdłużej, proces usuwania kamienia kotłowego należy regularnie powtarzać.

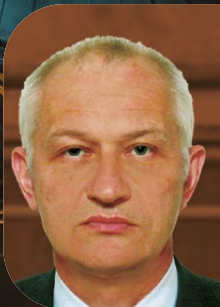


Rys. 5. Płomieniówka pokryta kamieniem kotłowym

Literatura:

1. A. Jakubik, Woda w wysokoprężnych elektrowniach parowych, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1967.
2. J. Stańda, Woda do kotłów parowych i obiegów chłodzących siłowni ciepłych, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-techniczne, 1999.
3. W. D. Piotr Orłowski, Kotły parowe w energetyce przemysłowej, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1991.
4. Polska Norma PN-85/C-04601 - Woda do celów energetycznych - Wymagania i badania jakości wody dla kotłów wodnych i zamkniętych obiegów ciepłowniczych.
5. Polska Norma PN-C-04607:1993 Woda w instalacjach ogrzewania. Wymagania i badania dotyczące jakości wody.
6. Polska Norma 3. PN-EN 12952-12:2006 – Kotły wodnorururowe i urządzenia pomocnicze – Część 12: Wymagania dotyczące jakości wody zasilającej i wody kotłowej.
7. J. Marjanowski, „Wpływ jakości wody zasilającej kotły parowe na oszczędne i racjonalne ich odsalanie,” INSTAL, pp. 5-12, 11 2020.
8. L. Ziółkowski, „Chemiczne czyszczenie kotłów - metodologia przygotowania i sposoby realizacji (cz. I),” Piece przemysłowe i kotły, pp. 40-51, VII-VIII 2012.
9. T. Szymura, Chemia w inżynierii materiałów, Lublin: Politechnika Lubelska, 2015.
10. Ustawa z dnia 21 grudnia 2000 r. o dozorcze technicznym (Dz. U. z 2024 r. poz. 1194)

DRONY W SŁUŻBIE BEZPIECZEŃSTWU



MGR INŻ. PIOTR NIEMCZYK

Kierownik Działu Technicznego
Oddział we Wrocławiu
Urząd Dozoru Technicznego



MGR INŻ. GRZEGORZ ŁUKASIEWICZ

Specjalista Urządzeń Ciśnieniowych
Oddział we Wrocławiu
Urząd Dozoru Technicznego

Najnowocześniejsze metody badawcze, takie jak emisja akustyczna czy impulsowe prądy wirowe, stały się już codziennością w praktyce inżynierskiej. Kierunki rozwoju badań zmiernają ku wsparciu ich poprzez innowacyjne techniki, które często uzupełniają bądź nawet zastępują pracę człowieka. W UDT wciąż rozwijamy flotę dronów przeznaczonych do pracy w przestrzeniach zamkniętych lub na wysokościach. Można zdecydowanie stwierdzić, że obecnie drony stały się narzędziem wykorzystywanym do zapewnienia bezpieczeństwa publicznego.

Koncepcja wykorzystania dronów do przeprowadzania zdalnych inspekcji zrodziła się w Urzędzie Dozoru Technicznego w ciągu ostatnich kilku lat. Taka metoda wsparcia badań stała się możliwa dzięki pojawieniu się na rynku specjalistycznych dronów do inspekcji w przestrzeniach zamkniętych. Obudowa drona Elios 1 ma kształt kuli, a metoda prowadzenia inspekcji polega na zetknięciu obudowy drona z powierzchnią inspekcyjną i "toczeniu" obudowy wzdłuż powierzchni badanej.



Zdj. 1. Dron klatkowy ELIOS 1 (Flyability)



Zdj. 2. Dron klatkowy ELIOS 2 (Flyability)

DRONY ELIOS

W celu przeprowadzenia badań inspekcyjnych jako pierwsze wykorzystano drony Elios 1. W tym modelu urządzenie w kuli osadzone jest na konstrukcji żyroskopowej, dzięki czemu jest ono zawsze w pionie, a obudowa może się obracać w dowolnych kierunkach. Pewnym utrudnieniem dla osoby przeprowadzającej badanie są widoczne w kadrze obrazu elementy siatki zabezpieczającej drona.

Nową koncepcję wykorzystano dla nieco innej funkcjonalności drona Elios 2. Od roku 2020 UDT w badaniach wykorzystuje również drony, które charakteryzują się odmienną konstrukcją od poprzedniego modelu (Elios 1)

W przypadku Eliosa 2 urządzenie w klatce zamontowane jest nieruchomo, a wysunięta poza obrys sfery kamera daje możliwość wykonania zdalnej inspekcji. Sama kamera poza sferą umiejscowiona jest na specjalnych amortyzatorach zabezpieczających ją przed ewentualnym uszkodzeniem. Pozwoliło to wyeliminować widoczne poprzednio w kadrze elementy klatki. Dron stabilizowany jest przez czujniki laserowe i optyczne, co sprawia, że lot jest bardzo stabilny, a inspekcja jeszcze dokładniejsza.

BUDOWA I PARAMETRY DRONA ELIOS 2

Sfera < 400 mm – umożliwi wlot do urządzenia, które ma zostać poddane zdalnej inspekcji, przez właz minimum 400 mm
Kamera 4K Ultra HD: 3840 x 2160 at 30 fps
Oświetlenie własne: LED 10 tys. lumenów
Kamera termowizyjna
Zakres pracy od 0°C do +50°C – w skrajnych temperaturach może zaistnieć konieczność odpowiedniego przygotowania
Czas lotu: do 10 min

ZASTOSOWANIE DRONÓW

Obecnie do wykonywania zdalnych inspekcji wykorzystywane są drony typu Elios 2. Używa się ich do badania zbiorników magazynowych o różnym przeznaczeniu oraz kształcie. Są również stosowane do oceny stanu technicznego kotłów, kominów przemysłowych, dźwigów osobowych czy konstrukcji stalowych.

W ostatnich latach nastąpił intensywny rozwój zdalnych inspekcji z wykorzystaniem dronów Elios 2. Tę technikę zastosowano w wielu branżach przemysłowych, m.in. petrochemicznej i rafinerijnej, spożywczej, metalurgicznej czy chemicznej.



Piloci dronów w Urzędzie Dozoru Technicznego posiadają uprawnienia Urzędu Lotnictwa Cywilnego minimum UAVO VLOS. Część personelu lotniczego posiada wyższe kompetencje. Dodatkowo UDT ma wykupione ubezpieczenia aerocasco. Piloci latający dronami przeszli szkolenia produktowe zakończone uzyskaniem certyfikatów trenerów dronów Elios 1 i Elios 2.

Spektrum wykorzystania dronów będących na wyposażeniu Urzędu Dozoru Technicznego jest bardzo duże. Można ich używać wszędzie tam, gdzie dostęp jest bardzo utrudniony bądź niemożliwy.

PRZYKŁADY INSPEKCJI ZDALNEJ Z WYKORZYSTANIEM DRONÓW ELIOS 2 I ELIOS 1

BRANŻA CHEMICZNA

Z wykorzystaniem drona Elios 1 zrealizowana została inspekcja wnętrza dwóch zbiorników o pojemności 120 m³, każdy w atmosferze azotowej. Przy pomocy kroćca do zbiorników podawany był azot tak, aby utrzymać w nich niewielkie nadciśnienie. Badania zakończyły się pełnym sukcesem i pozwoliły wyeliminować konieczność przeprowadzenia inspekcji przez człowieka, dla którego wejście do takiego zbiornika byłoby bardzo niebezpieczne.



Zdj. 3. Obrazy z kamery z badania zbiornika w atmosferze azotowej dronem Elios 1

Dzięki przeprowadzeniu inspekcji na różnych urządzeniach udało się odpowiednio wcześniej zdiagnozować różne uszkodzenia, co pozwoliło w bezpieczny sposób zaplanować naprawy i zapobiegło awaryjnemu zatrzymaniu maszyn.

BRANŻA PALIWOWA I PETROCHEMICZNA

Obszarem działalności UDT w zakresie zdalnej inspekcji z wykorzystaniem drona Elios 2 są również zbiorniki na stacjach paliw. W wielu przypadkach wejście pracowników

do zbiorników jest utrudnione bądź niemożliwe. W takich przypadkach bardzo dobrze sprawdza się zdalna inspekcja dronem Elios 2 realizowana przez UDT. Zdjęcia z inspekcji zdalnej zbiornika magazynowego zlokalizowanego na jednej z baz paliw w Polsce pokazano poniżej.



Zdj. 4. Obrazy z kamery z rewizji wewnętrznej zbiornika magazynowego (centralne połączenia wzmocnienia konstrukcji dachu)



Zdj. 6. Obrazy z kamery drona przedstawiające typową rewizję wewnętrzną zbiornika podzielnego na stacji paliw (dwie komory)

BRANŻA ENERGETYCZNA

Zdalne inspekcje kotłów energetycznych były wykonywane podczas okresów postojowych. Pozwoliło to skrócić czas przestojów remontowych urządzeń i wyeliminować potrzebę stawiania rusztowań. Tradycyjna inspekcja kotłów jest bardzo trudna i niebezpieczna, ponieważ wiąże się z pracą na dużych wysokościach. Do niektórych miejsc nie ma dostępu nawet z poziomu rusztowań, co wynika z budowy danego urządzenia. Dzięki wykorzystaniu dronów można bez problemu wlecieć i obejrzeć wskazane miejsca. Poniżej kilka zdjęć z inspekcji kotłów.



Zdj. 7. Kamera drona Elios 2 przekazała obrazy przedstawiające różne elementy kotłów energetycznych wykonane podczas inspekcji zdalnej

TRANSPORT BLISKI

Zdalne inspekcje prowadzone są nie tylko dla grup urządzeń ciśnieniowych. UDT wykorzystuje drony również do kontrolowania elementów, szybów i maszynowni **dźwigów osobowych**. Niektóre urządzenia są tak skonstruowane, że zastosowanie badań zdalnych jest doskonałym uzupełnieniem pracy człowieka, a przy pewnych czynnościach nawet ją zastępuje. Przykłady wskazano poniżej.

- Konstrukcja urządzenia jest taka, że dostęp do kół linowych i osprzętu jest niemożliwy bez użycia specjalistycznych technik, wykorzystujących podejście linowe. Zawsze stwarza to pewne zagrożenia.
- Konstrukcja i lokalizacja urządzenia są takie, że dojście do poszczególnych elementów jest możliwe tylko poprzez demontaż części dachu budynku.

Inspekcja zdalna dronem Elios 2 daje możliwości obejścia wszystkich tych elementów bez narażania badającego na dodatkowe ryzyko i zmniejsza koszty, które musi pokryć eksploatujący za przygotowanie urządzenia do badania i czas jego postoju. Poniżej zaprezentowano zdjęcia przedstawiające zdalną inspekcję dźwigu osobowego.



Zdj. 9. Obraz z kamery drona przedstawiający uszkodzenie koła linowego w dźwigu osobowym

ROZWÓJ INNOWACJI

Przed nami kolejne lata intensywnego rozwoju inspekcji zdalnej w Urzędzie Dozoru Technicznego. Flota UDT zostanie wzmocniona nowymi dronami przeznaczonymi do wykonywania badań w warunkach zewnętrznych, wyposażonymi w kamery o dużej rozdzielczości oraz kamery termowizyjne. Dodatkowo będzie możliwość ich rozbudowy o kolejne specjalistyczne kamery, czujniki, sensory itp.

Wśród obiektów badanych zdalnie z wykorzystaniem dronów istotne miejsce zajmą instalacje fotowoltaiczne. Drony wyposażone w kamery termowizyjne będą w stanie szybko i precyzyjnie wskazać uszkodzone panele.

Wzmocniony zostanie udział dronów w badaniach żurawi w trakcie wykonywania badań przez inspektora UDT. Są to bardzo wysokie urządzenia (do około 100 metrów), a część ich elementów jest dostępna jedynie, gdy są zdemontowane. Drony pozwolą uniknąć konieczności każdorazowej rozbiorczy przed inspekcją.

Wykorzystanie dronów do inspekcji elementów, do których nie ma dostępu w trakcie eksploatacji, jest bardzo istotną rolą nowego sposobu wykorzystywania znanych już dronów.

Wykorzystanie dronów do badań wielu urządzeń oraz instalacji znacznie skraca czas prac, obniża koszty eksploatacji oraz minimalizuje ryzyko niebezpiecznego zdarzenia czy nie szczęśliwego wypadku.

Kolejnym polem do zastosowania dronów są farmy wiatrowe. Łopaty wiatraków są narażone na różnego rodzaju uszkodzenia. Mogą to być pęknięcia, uszkodzenia powstałe wskutek uderzenia pioruna czy zderzenia z ptakami. Inspekcje zdalne z wykorzystaniem dronów są sposobem na szybką analizę stanu powierzchni łopat. Tradycyjne inspekcje wykonywane są z użyciem technik alpinistycznych, co jest bardzo niebezpiecznym, trudnym i czasochłonnym przedsięwzięciem.

Urząd Dozoru Technicznego wspiera rozwój i dba o bezpieczeństwo, dlatego na bieżąco analizujemy zapotrzebowania branż na inspekcję zdalną. Miejsca trudno dostępne, niebezpieczne atmosfery czy prace na wysokościach są kolejnymi wyzwaniami dla ważnego ognia uzupełniającego, jakim są drony.

DRONY UDT WSPIERAJĄ REWIZJE ZBIORNIKÓW PALIWA



MGR INŻ. PIOTR NIEMCZYK

Kierownik Działu Technicznego
Oddział we Wrocławiu
Urząd Dozoru Technicznego



MGR INŻ. GRZEGORZ ŁUKASIEWICZ

Specjalista Urządzeń Ciśnieniowych
Oddział we Wrocławiu
Urząd Dozoru Technicznego

W obszarze badań urządzeń technicznych trwa nieustająca ewolucja. Ocena stanu technicznego urządzeń i instalacji stała się dziś priorytetem, a początki ma niemal trzy wieki temu, gdy pierwsza rewolucja przemysłowa uzmysłowiła ludziom, że maszyny mogą stanowić zagrożenie dla ich życia i zdrowia.

W dzisiejszym świecie czujemy się bezpiecznie, odwiedzając galerię handlową czy stację paliw. W wielu ogólnodostępnych budynkach spotykamy urządzenia takie jak tzw. windy czy schody ruchome, które poddawane inspekcjom dają pewność bezpiecznego przemieszczania się. Tak też jest na stacjach paliw. Nie zawsze zdajemy sobie sprawę, ile działań i inżynierskiej wiedzy wymaga zapewnienie bezpieczeństwa.

Wiele badań realizowanych jest w warunkach trudnych, wysokiego zapylenia i w obecności chemikaliów, w atmosferach zapalnych, trujących lub na wysokości czy w trudno dostępnych miejscach. W ostatnich latach rozwój technik badawczych w znacznej mierze skierowano na tory inspekcji wykorzystującej intensywny rozwój zaawansowanych dziedzin, takich jak robotyka czy cyfryzacja. Dzisiaj wspierają nas bezzałogowe statki powietrzne nazywane dronami. Choć te jednostki latające znane są od dość dawna, to wciąż odkrywamy ich nowe zastosowania. Ciągłe przybywa firm i branż zainteresowanych tym sposobem wsparcia pracy człowieka.

Dzięki dronom osadzonym w specjalnie skonstruowanych obudowach w kształcie kuli można z powodzeniem wykonywać inspekcje przestrzeni zamkniętych. Metoda badania polega na locie dronem w bardzo bliskiej odległości od ściany urządzenia podlegającego inspekcji. Obraz z kamery zainstalowanej na dronie jest przekazywany online dla operatora i zapisywany na karcie SD w dronie. Daje

to możliwość bardzo wnikliwej analizy materiału odtwarzanego na komputerze.

Rewizje wewnętrzne z wykorzystaniem dronów prowadzone są przez UDT m.in. dla zbiorników na stacjach paliw. Inspekcje wykonuje się od 2020 r. Do badań używane są drony ELIOS 2. Umożliwiają one ocenę stanu technicznego poszczególnych elementów zbiorników.

REWIZJE WEWNĘTRZNE

Gdy nie są wykorzystywane drony, rewizje wewnętrzne mogą być wykonywane przy użyciu kamer wprowadzanych do zbiornika.

Nowe rozwiązania pozwalają udoskonalać jakość i dokładność oceny stanu technicznego.

Wykorzystanie dronów do wykonywania rewizji wewnętrznych pozwala na ograniczenie do minimum konieczności wejścia inspektora do zbiornika w celu oceny stanu technicznego urządzenia. Bezpieczeństwo ludzi zawsze jest najważniejsze.

W przypadku stacji paliw ma to podwójne znaczenie. Po pierwsze, ograniczamy udział człowieka w badaniu wykonywanym w trudnym otoczeniu. Po drugie, dokładność oceny stanu technicznego zbiorników jest dużo większa. Za pomocą drona i jego wyposażenia zwiększa się pewność, że zbiorniki zostały szczegółowo przebadane, i tym samym minimalizuje się potencjalne zagrożenie, jakie mogą stanowić dla ludzi i środowiska. Ta zaawansowana technika daje większy poziom precyzji oceny stanu zbiorników, ich szczelności i pozwala na dalsze bezpieczne użytkowanie.

ORGANIZACJA BADAŃ

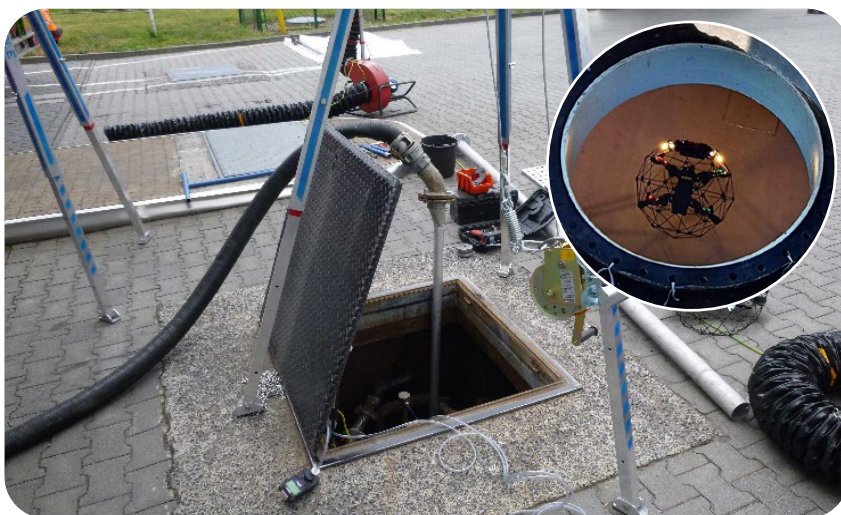
Podczas rewizji wewnętrznych zbiorników na paliwo na stacjach zbiorniki poddawane są ocenie stanu technicznego m.in. z wykorzystaniem dronów UDT – ELIOS 2. Do realizacji tego zadania Urząd Dozoru Technicznego przygotowywał się odpowiednio wcześniej. Zorganizowanych jest kilka lokalizacji stacjonowania dronów w Polsce. Duże znaczenie ma personel zaangażowany z przygotowanie, planowanie i prowadzenie badań. Zapewniono odpowiedni zespół przeszkolonych pilotów tak, żeby skutecznie zapewnić terminowe wykonanie rewizji.

Do wykonywania rewizji wewnętrznych na stacjach paliw wykorzystywane są drony ELIOS 2

- sfera < 400 mm umożliwia wlot do urządzenia, które ma zostać poddane inspekcji przez właz 400 mm
- kamera 4k Ultra HD: 3840 x 2160 at 30 fps
- oświetlenie własne LED 10 tys. lumenów
- kamera termowizyjna
- zakres pracy od 0°C do +50°C – w skrajnych temperaturach konieczność odpowiedniego przygotowania
- czas lotu do 10 min
- 7 czujników optycznych, automatycznie stabilizujących lot względem najbliższego otoczenia
- klatka bezpieczeństwa zapewniająca odporność na kolizje całej konstrukcji i chroniąca wirniki
- konstrukcja zabezpieczająca kinetycznie kamerę i umożliwiająca nagrywanie bez ograniczania kadru

Zaangażowane strony, tj. UDT oraz zarządzający (właściciele) zbiorników, wyznaczają w swoich strukturach osoby odpowiedzialne za koordynację działań między stronami, co zapewnia płynną współpracę i terminowe badania na stacjach paliw zgodnie z harmonogramem. Przygotowuje się plan rewizji, określa stacje paliw, liczby zbiorników i komór, dla których będą wykonywane rewizje wewnętrzne z użyciem drona, oraz określa się terminy. Opracowanie planu umożliwia firmie zarządzającej zbiornikami odpowiednio ich przygotowanie do badań.

Urząd Dozoru Technicznego planuje zaś zadysponowanie sprzętu, pilotów i inspektorów tak, żeby badanie przebiegało sprawnie i bez zbędnych postojów. Wspólnym celem jest również minimalizowanie godzin postoju dla stacji paliw.



Rys. 1. Zdjęcia z przebiegu badań zbiornika paliwa z poziomu otoczenia (zdj. ZBM S.A. www.zbm.com.pl)

STATYSTYKI REWIZJI WEWNĘTRZNYCH

Inspekcje z użyciem bezzałogowych jednostek latających zrealizowano dotychczas dla kilkuset zbiorników, a zatem łącznie odpowiednio więcej komór, ponieważ niektóre zbiorniki są dwu-, a nawet trójkomorowe. UDT bardzo intensywnie wykorzystuje drony do inspekcji wewnętrznych i zewnętrznych w różnych branżach przemysłu.

REZULTATY BADANIA ZBIORNIKÓW DRONAMI

Inspekcje z zastosowaniem drona ELIOS 2 dla zbiorników paliwa polegają na ocenie stanu technicznego ścian wewnętrznych, połączeń arkuszy blach, wzmocnień konstrukcji w postaci pierścieni i osprzętu zamontowanego wewnątrz.

Przygotowanie do badań wymaga opróżnienia wszystkich komór z paliwa, zdalnego mycia, neutralizacji, wentylacji poszczególnych komór aż do uzyskania bezpiecznej atmosfery LEL 0% (ang. Lower Explosive Limit). Dobre przygotowanie zbiorników na stacjach paliw do badań znacznie usprawnia i skraca czas rewizji wewnętrznej oraz powoduje zminimalizowanie czasu postoju stacji.

Plan inspekcji zakłada również oględziny spoin obwodowych i wzdłużnych płaszcza zbiorników w miejscach dostępnych do oględzin oraz, w przypadku zbiorników magazynowych naziemnych, wszystkich dostępnych połączeń spawanych konstrukcji dachu. Szczególną uwagę podczas badania zwraca się na możliwe występowanie pęknięć w materiale. Ocenia się je jakościowo oraz ilościowo, mierzy się wielkość zmian. Jeśli takie występują, to mogą być co najmniej wskazaniem do oceny przy następnej rewizji wewnętrznej w zależności od stopnia uszkodzenia.

Jedną z zalet wykonywania rewizji wewnętrznych naszymi dronami jest możliwość nagrywania materiału trwale z lotu. Poza podglądem na aparaturze pilota, cały lot nagrywa się w rozdzielczości 4K, co umożliwia dokładne prześledzenie filmu z lotu na dużym ekranie po zakończeniu lotów, w odpowiednich do tego warunkach. Co ważne, nagrania te są przechowywane na serwerach, co umożliwia powrót do nich w dowolnym momencie eksploatacji zbiornika.

PERSPEKTYWY

Wykorzystanie dronów do badań zbiorników paliwa jest przykładem zastosowania innowacyjnych technik w badaniach dla bezpieczeństwa. Widząc, jak duże jest zapotrzebowanie na taką inspekcję, UDT planuje otwarcie kolejnych punktów stacjonowania dronów na terenie Polski z przeszkolonym personelem. Opisane dotychczas cechy i zalety badań oraz samego urządzenia w połączeniu z mobilnością jego konstrukcji w przestrzeniach zamkniętych oraz solidnością systemów bezpieczeństwa daje nam wysoko specjalistyczne narzędzie inspekcyjne.

eUDT

PORTAL INTERNETOWY

Urzędu Dozoru Technicznego

Załącz konto na portalu eUDT.

Wypełnij formularz rejestracyjny
dostępny na <https://eudt.gov.pl/>
i korzystaj z usług oferowanych przez

UDT on-line!



- Wygodny i szybki dostęp do informacji o Twoich urządzeniach, terminach badań i rozliczeniach finansowych z UDT
- Darmowy dostęp do portalu 24/7/365
- Łatwe i proste śledzenie zdarzeń związanych z Twoimi urządzeniami
- Możliwość ustawienia własnego kalendarza wydarzeń oraz alertów
- Możliwość wyświetlania i pobierania dokumentów UDT
- Elektroniczna korespondencja z UDT, więcej spraw, które załatwisz on-line
- Decyzje i protokoły w formie elektronicznej
- Płatności on-line

