

Tomasz Katz*

Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa

Sprawdzanie i weryfikacja defektoskopów ultradźwiękowych

Characterization and verification of ultrasonic flaw detector

ABSTRACT

The purpose of this article is to present the most important requirements and problems related to periodic inspection of ultrasonic flaw detectors in accordance with requirements of standard PN-EN 12668-1: 2010. Particular attention has been paid to the measurement of ultrasonic flaw detector parameters and requirements concerning specialist measuring equipment. The form of ultrasonic flaw detector certificate was proposed, which specifies all tests of group 2 of PN-EN 12668-1: 2010. The proposed certificate confirms the compatibility of the flaw detector with the specified standard and the test group under which the equipment was tested.

Keywords: characterization, verification, calibration, flaw detector

STRESZCZENIE

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie najważniejszych wymagań oraz przedyskutowanie problemów związanych z okresową kontrolą defektoskopów ultradźwiękowych zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12668-1:2010. Szczególną uwagę zwrócono na problematykę pomiaru podstawowych parametrów aparatu ultradźwiękowego, w tym wymagania dotyczące stosowanej aparatury kontrolno-pomiarowej. Zaproponowano wzór świadectwa sprawdzenia defektoskopu ultradźwiękowego, w którym wyszczególniono i potwierdzono wykonanie wszystkich testów grupy 2 normy PN-EN 12668-1:2010. Proponowane świadectwo potwierdza zgodność defektoskopu z wersją normy oraz grupą testów jakiej podlega testowany sprzęt.

Słowa kluczowe: sprawdzenie, weryfikacja, wzorcowanie, defektoskop

1. Wstęp

Jednym z elementów systemu zapewnienia jakości badań nieniszczących prowadzonych przez specjalistyczne firmy i laboratoria jest nadzór nad aparaturą badawczą. W przypadku badań ultradźwiękowych nadzór ten sprowadza się do sprawdzania i weryfikacji parametrów defektoskopów ultradźwiękowych, głowic, kompletnej aparatury oraz wzorców i próbek odniesienia. Nowe elementy wyposażenia ultradźwiękowego powinny posiadać certyfikaty wystawiane przez producentów potwierdzające zgodność z odpowiednimi normami.

W szczególności, w przypadku defektoskopów ultradźwiękowych, jest to norma PN-EN 12668-1 [1], zaś w przypadku głowic ultradźwiękowych norma PN-EN 12668-2 [2]. Jednak nadzór nad aparaturą obejmuje również okresowe kontrole elementów wyposażenia badawczego będących w eksploatacji. Do rutynowych obowiązków operatorów badań ultradźwiękowych należy np. sprawdzanie kompletnej aparatury ultradźwiękowej w układzie defektoskop, kabel połączeniowy, głowica. Sprawdzenia tego dokonuje się w ramach uproszonej kontroli operatorskiej według PN-EN 12668-3 [3]. Norma PN-EN 12668-1:2010 [1] wymaga jednak, aby defektoskopy ultradźwiękowe poddawane były także bardziej kompleksowej kontroli okresowej dokonywanej raz na 12 miesięcy lub po naprawie aparatu ultradźwiękowego. W tym celu norma definiuje specjalną kategorię testów określaną jako testy grupy 2. Testy te mogą być wykonywane zarówno przez serwis producenta, specjalistyczną firmę zewnętrzną, jak też przez samego użytkownika. Należy podkreślić, że kontrola okresowa defektoskopu według PN-EN 12668-1:2010 ma ściśle określony interwał czasowy, precyzyjnie określony zestaw parametrów podlegających kontroli a także sposób ich pomiaru

i kryteria akceptacji. Należy zauważyć, że analogiczna norma dotycząca głowic ultradźwiękowych, PN-EN 12668-2:2010 [2] nie wprowadza obligatoryjnego nakazu kontroli okresowej głowic a jedynie stwierdza, że kontrola taka może zostać wprowadzona na mocy uzgodnień między zainteresowanymi stronami. Doprowadza to do sytuacji, że firmy wykonujące badania nieniszczące metodą ultradźwiękową posiadają świadectwa zgodności na głowice ultradźwiękowe wystawione wiele lat wcześniej, które nie odzwierciedlają aktualnego stanu głowic. Problem ten poruszono w pracy [4], gdzie omówiono przyczyny prowadzące do stopniowej degradacji parametrów głowic ultradźwiękowych oraz przedyskutowano negatywny wpływ tych zmian na jakość badania ultradźwiękowego.

2. Przegląd parametrów aparatu ultradźwiękowego

Pełne zestawienie parametrów charakteryzujących aparat ultradźwiękowy przedstawiono w punkcie 6. normy [1]. Część parametrów ma charakter czysto informacyjny, jak np. waga, wymiary czy dostępne wejścia – wyjścia sygnałowe. Do parametrów, które określają sprawność techniczną defektoskopu oraz mają istotny wpływ na przebieg badań należą: częstotliwość powtarzania impulsu, zakres napięcia zasilania, stabilność amplitudy impulsu nadawczego oraz podstawy czasu w funkcji napięcia zasilania, zakres temperatur pracy, szczegółowe parametry nadajnika (kształt impulsu, napięcie impulsu V_{pp} , czas narastania, czas trwania), szczegółowe parametry odbiornika (charakterystyka liniowości pionowej, częstotliwość środkowa oraz szerokość pasma dla poszczególnych filtrów, poziom szumów w nV/\sqrt{Hz}) oraz dokładność tłumika decybelowego. Producent powinien określić wartości nominalne tych parametrów w specyfikacji nowego urządzenia. Wykonując

*Autor korespondencyjny. E-mail: tkatz@ipt.pan.pl

kolejne sprawdzenia okresowe defektoskopu przewidziane w normie [1], należy odnosić się do tych parametrów.

3. Testy grupy 2

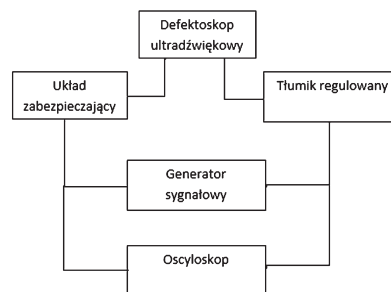
Kontrola aparatu ultradźwiękowego według normy PN-EN 12668-1 wyraźnie określa sposób i zakres sprawdzenia defektoskopu ultradźwiękowego. Podstawą do pomiarów jest grupa 2, która zakłada testy każdego aparatu ultradźwiękowego, okresowo co 12 miesięcy lub po naprawie urządzenia. Wraz z nowym urządzeniem spełniającym wymogi normy [1] dostajemy świadectwo kontroli oraz raport z testów wykonanych przez producenta urządzenia, tzw. zero point test. Raport ten jest pierwszym zapisem parametrów technicznych defektoskopu. Należy mieć na uwadze, że dokument ten jest ważny przez 12 miesięcy od daty kontroli urządzenia, nie zaś od daty dostawy urządzenia do klienta. Po upływie 12 miesięcy, aby uzyskać aktualne świadectwo stanu technicznego defektoskopu, należy wykonać szereg pomiarów. Tabela 2 zawarta w normie [1] określa zestaw testów, które należy bezwzględnie wykonać, aby świadectwo wystawione przez jednostkę sprawdzającą było zgodne z przedmiotową normą. W ramach kontroli okresowej każdy defektoskop ultradźwiękowy powinien zostać poddany poniżej wymienionym testom i sprawdzeniom. Numery podane w nawiasach odpowiadają konkretnym punktom normy PN-EN 12668-1: 2010:

- stan i wygląd zewnętrzny (9.2);
- stabilność po czasie nagrzewania (9.3.2);
- stabilność krótkookresowa – jitter (9.3.3);
- stabilność w funkcji napięcia zasilania (9.3.4);
- parametry impulsu nadawczego (9.4.2);
- charakterystyka częstotliwościowa odbiornika (9.5.2);
- szumy wzmacniacza (9.5.3);
- dokładność tłumika decybelowego (9.5.4);
- liniowość zobrazowania pionowego (9.5.5);
- liniowość podstawy czasu (8.8.2).

Poszczególne testy aparatury ultradźwiękowej należy przeprowadzać zgodnie z określonym schematem połączenia defektoskopu z urządzeniami pomiarowymi przy ściśle określonych ustawieniach defektoskopu. Poniższy schemat przedstawia sposób połączenia elementów aparatury do głównych testów defektoskopu ultradźwiękowego wymienionych powyżej.

Lista kontrolna testów aparatury ultradźwiękowej rozpoczyna się od sprawdzenia stanu zewnętrznego urządzenia tak, aby można było wykluczyć niesprawność na skutek upadku lub zalania aparatury ultradźwiękowej. Następnie przechodzi się do testów stabilności pracy urządzenia w funkcji napięcia zasilającego. W dalszej kolejności wykonywane są testy nadajnika oraz odbiornika aparatury ultradźwiękowej. Kontrola nadajnika polega na przełączeniu defektoskopu na pracę metodą przepuszczenia i połączeniu wyjścia nadajnika z wejściem oscyloskopu cyfrowego przy zastosowaniu tłumika oraz bezreakcyjnego opornika 50Ω. Następnie należy wykonać pomiary parametrów impulsu nadawczego, tj. jego napięcia V_{50} [V], czasu narastania t_r [ns], czasu trwania t_d [ns] oraz, w przypadku impulsów prostokątnych, napięcia rewerberacji V_r [V] dla maksymalnej i minimalnej częstotliwości powtarzania PRF. Pomiary należy wykonać dla każdego ustawienia napięcia impulsu nadawczego przy minimalnym i maksymalnym obciążeniu nadajnika.

Poniższa tabela I przedstawia przykładowy zapis wyników badania parametrów szpilkowego impulsu nadawczego dla różnych wartości PRF, napięcia oraz obciążenia nadajnika defektoskopu ultradźwiękowego.



Rys. 1. Schemat połączeniowy układu do testowania defektoskopu ultradźwiękowego

Fig. 1. Connection diagram of the ultrasonic flaw detector system

Tab. 1. Zapis parametrów badania impulsu nadajnika zgodnie z PN-EN 12668-1:2010

Tab. 1. Recording parameters of transmitter pulse according to PN-EN 12668-1:2010

Ustawienia nadajnika	Napięcie impulsu V_{50} , V	Czas narast. t_r , ns	Czas trwania t_d , ns	Rewerberacja V_r , V	Akceptacja
1500 Hz, Szpilka, -120 V, 50 Ω	-113	6,4	74,8	n.d.	Tak
1500 Hz, Szpilka, -120 V, 1000 Ω	-115	5,0	115,0	n.d.	Tak
1500 Hz, Szpilka, -300 V, 50 Ω	-282	6,9	42,8	n.d.	Tak
1500 Hz, Szpilka, -300 V, 1000 Ω	-286	5,7	62,8	n.d.	Tak
15 Hz, Szpilka, -120 V, 50 Ω	-113	6,4	74,8	n.d.	Tak
15 Hz, Szpilka, -120 V, 1000 Ω	-115	6,5	117,0	n.d.	Tak
15 Hz, Szpilka, -300 V, 50 Ω	-282	7,2	42,4	n.d.	Tak
15 Hz, Szpilka, -300 V, 1000 Ω	-287	5,8	62,8	n.d.	Tak

Kryteria akceptacji:

- napięcie impulsu nadawczego - V_{50} w granicach $\pm 10\%$ napięcia nominalnego;
- czas narastania - t_r mniejszy od maksymalnej wartości nominalnej;
- czas trwania - t_d w granicach $\pm 10\%$ wartości nominalnej;
- rewerberacja - V_r poniżej 4% napięcia peak-to-peak impulsu nadawczego;

Weryfikacja czasu narastania impulsu jest ważna, ponieważ parametr ten ma istotny wpływ na pobudzenie głowic wysokich częstotliwości. Przetworniki piezoelektryczne takich głowic wymagają szybkiego czasu narastania impulsu w celu wzbudzenia w nich drgań. Czas trwania impulsu pobudzającego przetwornik wpływa z kolei na osiową zdolność rozdzielczą sygnału emitowanego przez głowicę. Generowanie zbyt długiego impulsu powoduje rozmycie echa i utratę rozdzielczości osiowej układu, co przekłada się na obniżoną dokładność określania położenia

wad lub innych reflektorów odbijających fale ultradźwiękowe. Testy odbiornika aparatu sprawdzają charakterystykę częstotliwościową odbiornika, szumy wzmacniacza, dokładność tłumika decybelowego, liniowość zobrazowania pionowego oraz liniowość podstawy czasu.

W jednym przypadku testów grupy 2 norma określa dwie różne metodologie sprawdzania dla starszych modeli defektoskopów opartych na lampie oscyloskopowej oraz nowoczesnych urządzeń cyfrowych. Sprawdzenie liniowości podstawy czasu urządzenia analogowego polega na wygenerowaniu na wejściu odbiornika defektoskopu, w równych odstępach, 11 krótkich impulsów sinusoidalnych tak, aby trzeci impuls znajdował się na 2 działce podstawy czasu, zaś impuls dziewiąty na 8 działce podstawy czasu. Weryfikacja polega na sprawdzeniu położenia pozostałych 9 impulsów i zapisaniu ich odchyleń od pozycji nominalnej dla różnych zakresów podstawy czasu. Kryterium akceptacji to odchylenie pozycji impulsów nie większe niż $\pm 1\%$ zakresu podstawy czasu.

Sprawdzenie liniowości podstawy czasu aparatu cyfrowego polega na wygenerowaniu sygnału testowego o częstotliwości f_0 ustawionego filtra i czasie trwania 1 cyklu sinusoidy. Sygnał ten podaje się na wejście odbiornika defektoskopu z kontrolowanym opóźnieniem równym wielokrotności 5% nastawionego zakresu obserwacji. Weryfikacja polega na porównaniu zmierzonych przez defektoskop położenia sygnału testowego z opóźnieniami nastawionymi na generatorze. Ewentualne różnice nie mogą przekraczać $\pm 0,5\%$ nastawionego zakresu obserwacji. Test taki powtarza się dla minimalnego, maksymalnego oraz pośredniego zakresu obserwacji, jaki można ustawić na defektoskopie. Należy zauważyć, że powyżej opisany test liniowości podstawy czasu można rozszerzyć i wykorzystać do określenia dokładności pomiarów czasu przejścia za pomocą testowanego defektoskopu ultradźwiękowego. Sprawdzenie takie może być przydatne np. dla laboratoriów wykonujących dokładne pomiary prędkości fal ultradźwiękowych w różnych materiałach.

4. Aparatura pomiarowa

Norma dotycząca charakterystyki i weryfikacji aparatury ultradźwiękowej wyszczególnia listę aparatury kontrolno-pomiarowej, która jest niezbędna do sprawdzenia defektoskopu ultradźwiękowego, wg testów grupy 2. Są to:

- 2 kanałowy oscyloskop z minimum 100 MHz pasmem;
- $50 \Omega \pm 1\%$ opornik bezreakcyjny;
- 50Ω kalibrowany tłumik o kroku 1 dB i zakresie tłumienia 0-100 dB ze skumulowanym błędem poniżej 0,3 dB na każde 10 dB w zakresie częstotliwości do 15 MHz;
- 2 kanałowy generator sygnałowy z zewnętrznym wyzwaniem i bramką do wyzwania wielu cykli sinusoidalnych o częstotliwościach w zakresie badanej aparatury;
- regulowane źródło zasilania DC.

Analizując listę niezbędnej aparatury, można stwierdzić, że w ofercie producentów specjalistycznej aparatury pomiarowej znajdziemy oscyloskop, generator, zasilacz DC czy też opornik. Jednak dużym problemem, a wręcz niemożliwością może okazać się znalezienie 50Ω , regulowanego tłumika o zakresie 0-100 dB i błędzie poniżej 0,3 dB na każde 10 dB tłumienia. Wiele dostępnych tłumików pracuje w zakresie 0-60 dB, co powoduje niezgodność z wymaganiami normy. Tłumiki

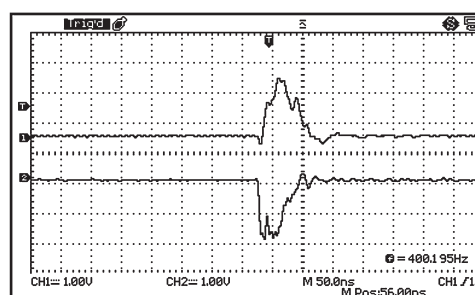
te często nie spełniają warunku rezystancji we/wyj, ponieważ są przystosowane do pracy w układach 75Ω .



Rys. 2. Z lewej tłumik dopasowujący amplitudę impulsu nadawczego. Z prawej układ odwracający impulsy nadawcze defektoskopu ultradźwiękowego i dopasowujące go do standardu TTL

Fig. 2. Silencer adjusting the amplitude of the transmit pulse (left). Inverted ultrasonic flaw detector and matched to TTL (right)

Chcąc wykonać testy zgodnie z normą [1] i schematem połączeniowym przedstawionym na rys. 1 trzeba uwzględnić polaryzację i amplitudę impulsu z nadajnika defektoskopu, która nie jest dopasowana do standardu sygnału TTL wymaganego na wejściach wyzwalających generatora sygnałowego. Należy mieć na uwadze, że defektoskopy ultradźwiękowe generują impuls nadawczy spolaryzowany ujemnie, co powoduje problem z odbiorem sygnału przez generator nawet po zastosowaniu tłumika decybelowego. Niezbędne jest więc urządzenie dopasowujące sygnał nadajnika defektoskopu do wejścia TTL generatora (rys. 2), które odwróci polaryzację sygnału z ujemnej na dodatnią tak jak zobrazowano to na rys. 3. Drugą cechą impulsu nadawczego defektoskopu, która stanowi problem dla urządzeń pomiarowych jest duża wartość napięcia generowanego przez układ nadajnika defektoskopu (rzędu 400 V i więcej). Napięcie o takiej wartości może uszkodzić wejście oscyloskopu lub wejście wyzwalające generatora sygnałowego, a nawet sam układ odwracający polaryzację sygnału. Z powodu różnic w zakresach napięć nadajnika w różnych modelach defektoskopów należy posiadać tłumik regulowany dopasowany do różnych napięć i rezystancji nadajników.



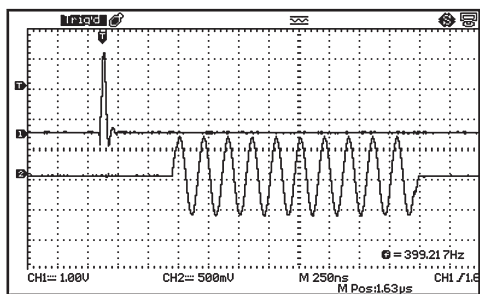
Rys. 3. Zobrazowanie przebiegów impulsu nadawczego (dolny) oraz impulsu odwróconego (górny) podawanego na wejście wyzwalające generatora sygnałowego

Fig. 3. Display of the transmit pulse waveform (bottom) and the inverted pulse (top) of the signal generator triggering

Zobrazowanie ekranu oscyloskopu pokazane na rys. 3 przedstawia na dolnym przebiegu impuls z nadajnika defektoskopu ultradźwiękowego. Impuls o polaryzacji ujemnej nie jest właściwy dla modułu wyzwalającego generatora sygnałowego. Górny przebieg przedstawia impuls dopasowany do standardu TTL zarówno pod względem polaryzacji, jak i amplitudy napięcia.

Na rys. 4 przedstawiono przebiegi dopasowanego sygnału

z nadajnika aparatu oraz testowego sygnału sinusoidalnego wygenerowanego z generatora sygnałowego. Jest to typowy sygnał testowy do sprawdzania charakterystyk częstotliwościowych odbiornika oraz szumów wzmacniacza. W celu zmniejszenia wpływu stanów nieustalonych na wyniki pomiarów norma zaleca stosowanie impulsu sinusoidalnego o długości 10 cykli.



Rys. 4. Przebiegi typowych sygnałów z nadajnika defektoskopu (górny) oraz sygnału testowego z generatora sygnałowego (dolny)
Fig. 4. Waveforms of typical signals from the defectoscope transmitter (top) and test signal from the signal generator (bottom)

5. Świadczenie sprawdzenia defektoskopu

Przeglądając świadectwa sprawdzenia defektoskopów wystawiane przez różne serwisy i jednostki sprawdzające aparaturę ultradźwiękową, napotyka się na liczne nieprawidłowości w wykonywanych testach lub też braki zapisów świadczących o wykonaniu danego typu badania.

ŚWIADCTWO SPRAWDZENIA DEFEKTOSKOPU ULTRADŹWIĘKOWEGO

Nr: _____

Niniejszym zaświadcza się, że poniżej opisany defektoskop ultradźwiękowy został przetestowany i zweryfikowany zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12668-1:2010 w zakresie testów Grupy 2 (badania okresowe co 12 m-cy oraz badania po naprawach).

Marka i model defektoskopu : _____
Numer seryjny S/N : _____
Właściciel : _____

APARATURA POMIAROWA:
Oscyloskop cyfrowy : _____
Generator sygnałowy : _____
Tłumak kalibrowany 100dB : _____
Regulowane źródło zasilania DC : _____
Opornik bezreakcyjny : _____

WARUNKI ŚRODOWISKOWE:
Temperatura : _____
Wilgotność : _____

WYNIKI KONTROLI:	AKCEPTACJA / NIEZGODNOŚĆ
1. Stan i wygląd zewnętrzny (9.2)	_____
2. Stabilność po czasie nagrzewania (9.3.2)	_____
3. Stabilność krótkookresowa - jitter (9.3.3)	_____
4. Stabilność w funkcji napięcia zasilania (9.3.4)	_____
5. Parametry impulsu nadawczego (9.4.2)	_____
6. Charakterystyka częstotliwościowa odbiornika (9.5.2)	_____
7. Szumy wzmacniacza (9.5.3)	_____
8. Dokładność tłumika decybelowego (9.5.4)	_____
9. Liniowość zobrazowania pionowego (9.5.5)	_____
10. Liniowość podstawy czasu (8.8.2)	_____

OKRES WAŻNOŚCI ŚWIADCTWA : _____ Od dnia do dnia
Wykonawca : _____ Data sprawdzenia : _____

Rys. 5. Proponowany wzór świadectwa sprawdzenia defektoskopu ultradźwiękowego

Fig. 5. Proposed model of the ultrasonic flaw detection certificate

Częstymi błędami są braki zapisów z testów badających stabilność urządzenia po czasie nagrzewania, stabilność krótkookresową oraz stabilność w funkcji napięcia zasilania. Spotyka się też braki zapisów dotyczących pomiarów szumów wzmacniacza. Analizowane świadectwa bywają niekompletne, a testy przeprowadzane w ramach kontroli okresowej wykonywane w sposób pobieżny, często z pominięciem niektórych pasm

filtrów odbiornika defektoskopu ultradźwiękowego.

Spotyka się też badania wykonywane nie w sposób czysto elektryczny, jak wymaga tego norma PN-EN 12668-1, lecz przy użyciu głowicy ultradźwiękowej oraz wzorców nr 1 lub nr 2.

W przypadku badania z użyciem głowicy nie można mówić o kontroli aparatu ultradźwiękowego według normy PN-EN 12668-1, lecz o uproszczonej operatorskiej kontroli aparatury kompletnej według normy PN-EN 12668-3.

W skrajnych przypadkach wystawione świadectwa są zapisem informacji pomiarowych bez podania jakichkolwiek danych identyfikacyjnych dotyczących zastosowanej aparatury pomiarowej oraz opisu wyników, który umożliwiłby ich porównanie z wymaganiami normy. Samo sprawdzenie dokładności tłumika decybelowego defektoskopu wymaga użycia zewnętrznego kalibrowanego tłumika decybelowego oraz udokumentowania zgodności między wartościami nastawianymi na tłumiku zewnętrznym oraz tłumiku aparatu.

6. Podsumowanie

Zapewnienie odpowiedniego nadzoru nad stanem technicznym stosowanych aparatów ultradźwiękowych jest bardzo ważnym czynnikiem zapewnienia jakości badań ultradźwiękowych.

Z przedstawionej analizy problematyki okresowego sprawdzania i weryfikacji defektoskopów ultradźwiękowych wynika jednak, że w wielu przypadkach coroczna kontrola, a w szczególności zapisy w jej świadectwach, nie są zgodne z wymaganiami normy PN-EN 12668-1:2010. W celu poprawy obecnego stanu rzeczy należy w pierwszym rzędzie dostosować się do jasno określonych wymagań tej normy. Ponieważ sprawdzanie aparatu ultradźwiękowego wymaga dobrego zrozumienia zasad jego działania oraz biegłości w jego obsłudze, wskazane jest też, aby personel dokonujący sprawdzenia defektoskopów posiadał kwalifikacje w metodzie ultradźwiękowej. Bardzo ważne jest również to, aby wystawiane świadectwa sprawdzenia wyszczególniały typy oraz numery seryjne zastosowanej aparatury kontrolno-pomiarowej oraz załączniki ze szczegółowymi wynikami wszystkich testów grupy 2. Wyniki te powinny umożliwiać jednoznaczne określenie, czy sprawdzany defektoskop spełnia wymagania normy [1]. Na rys. 5 pokazano przykładowy wzór świadectwa sprawdzenia defektoskopu, w którym wyszczególniono i potwierdzono wykonanie wszystkich testów grupy 2 normy PN-EN 12668-1:2010. Proponowane świadectwo potwierdza zgodność defektoskopu z wersją normy oraz grupą testów, jakiej podlega testowany sprzęt.

Do świadectwa powinien zostać załączony raport ze szczegółowymi zapisami wyników pomiarów.

7. Literatura/References

- [1] PN-EN 12668-1:2010, Badania nieniszczące – Charakteryzowanie i weryfikacja aparatury ultradźwiękowej – Część 1: Aparatura.
- [2] PN-EN 12668-2:2010, Badania nieniszczące – Charakteryzowanie i weryfikacja aparatury ultradźwiękowej – Część 2: Głowice.
- [3] PN-EN 12668-3:2014-02, Badania nieniszczące – Charakteryzowanie i weryfikacja aparatury ultradźwiękowej – Część 3: Aparatura kompletna.
- [4] S. Mackiewicz, "Podstawowe parametry głowic ultradźwiękowych oraz ich wpływ na jakość wykonywanych badań", Przegląd Spawalnictwa, vol. 88., no. 10, pp. 86-91, 2016.