

Badania ultradźwiękowe zbiorników kompozytowych

1. Wstęp

Zalety materiałów kompozytowych (mk) w wielu konstrukcjach wypierają dotąd tradycyjnie stosowane metale. Ze zrozumiałych względów przodują tu zastosowania w lotnictwie, które osiągnęły wysoki stopień zaawansowania technologicznego w tym także metod kontroli [1]. Wysoka korozyjna odporność materiałów kompozytowych (mk) szczególnie predestynuje je do zastosowań w przemyśle chemicznym, do magazynowania (zbiorniki) żrących materiałów płynnych i gazowych, ale często także wody. Wiele z tych konstrukcji, do budowy których zastosowano materiały kompozytowe (np. zbiorniki, rurociągi), to konstrukcje ciśnieniowe o parametrach wymagających poddania ich pod Dozór Techniczny.

Jednak pojawiające się awarie [2] powodują konieczność usprawnienia metod kontroli i możliwie szybkiego ich wdrożenia. Założono, że wprowadzenie badań ultradźwiękowych w zakresie kontroli zbiorników z mk może istotnie podwyższyć ich bezpieczną eksploatację i że można to zrobić względnie szybko. Tematem niniejszego artykułu jest raport z rozpoznania poprawności tego założenia oraz podania uwarunkowań technicznych i ewentualnie organizacyjnych wdrożenia. Badania do opracowania tego raportu wykonano w Zakładzie Ultra, który wykorzystał swoje możliwości techniczne i pokrył całość kosztów.

2. Możliwości i uwarunkowania fizyczne zastosowania badań ultradźwiękowych do badań materiałów kompozytowych

Dość powszechnie wiadomo że niektóre mk bada się ultradźwiękowo, a inne nie, choć występuje taka potrzeba. Jest to często związane z ograniczeniami fizycznymi oraz niedopasowaniem typowej aparatury ultradźwiękowej do występujących ograniczeń fizycznych. Podobnie jest z badaniem różnych żeliw, a także innych materiałów, które kolokwialnie określa się jako niejednorodne. Przykładowo świetnie się bada większość stali, choć wiadomo z metalografii o ich ziarnistej strukturze, bada się także betony, choć ich strukturę ziarnistą widać nieuzbrojonym okiem. Ciekawostką może być przykład stali austenitycznych, z których surowe blachy bada się nawet dobrze, a po pospawaniu okolice spoiny albo nie da się badać, albo jest to trudne. Należy zadać pytanie jakie parametry fizyczne badanej przestrzeni określają możliwość badań i jak tę możliwość uwarunkowują?

* mgr inż. Władysław Michnowski, dyrektor Zakładu Badań Materiałów ULTRA

** dr inż. Jarosław Mierzwa, wykładowca w Instytucie Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej

2.1. Przestrzeń akustyczna

Dla uproszczenia opisów wprowadźmy nazwy przestrzeni: akustyczna, nieakustyczna, przejściowa - nieco podobnie do przestrzeni przezroczystej i nieprzezroczystej w optyce. Większość fizycznie występujących przestrzeni to przestrzenie, które mogą na przemian być akustyczne lub nie. Jedyną przestrzenią absolutnie nie akustyczną jest próżnia, i to w całym zakresie częstotliwości od infra- do ultradźwięków. O tym, czy przestrzeń jest akustyczna decyduje nie tylko jej budowa fizyczna, ale także parametry ultradźwiękowe. Ta sama przestrzeń dla różnych parametrów ultradźwiękowych może być akustyczna lub nie. Jest oczywiste, że warunkiem badań ultradźwiękowych materiałów (w tym mk) jest aby tworzyły przestrzeń akustyczną, co osiąga się przez dobór parametrów ultradźwiękowych, choć mogą temu towarzyszyć ograniczenia. Zrozumienie, czy te wymuszone fizycznie ograniczenia mogą być w danym przypadku akceptowalne wymaga wyjaśnienia kilku nieskomplikowanych pojęć.

2.2. Własności akustyczne materiałów stałych

Właściwości akustyczne materiałów stałych określają wielkości, których definicje podano niżej.

2.2.1. Prędkość i długość fali

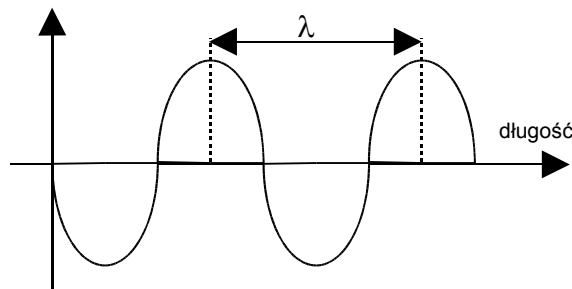
Długość fali (λ) – odległość pomiędzy najbliższymi cząstkami ośrodka drgającymi w tej samej fazie. Pomijając długością, częstotliwością i prędkością fali zachodzi następujący związek:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (I)$$

gdzie:

c - prędkość fali,

f - częstotliwość fali.



Rys.1 Chwilowy rozkład amplitudy drgań w funkcji długości w materiale

W materiałach stałych wyróżnia się trzy podstawowe typy fali:

- podłużna – cząsteczki drgają w kierunku rozchodzenia się fali,
- poprzeczna - cząsteczki drgają prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali,
- powierzchniowa – specjalny typ fali o charakterze podobnym do fali poprzecznej, który propagowany jest na powierzchniach.

Prędkość fali (c) - prędkość rozprzestrzeniania się ruchu drgającego w materiale. Wyraża się ją w km/s lub mm/us. Zależy ona od rodzaju materiału (jego modułów sprężystości gęstości, liczby Poissona). Każdy z typów fali ma inną prędkość.

2.2.2. Gęstość i ciężar właściwy

Gęstość (ρ) - masa materiału o jednostkowej objętości (podawana w kg/m^3 lub g/cm^3).

Ciężar właściwy - ciężar materiału o jednostkowej objętości (wyrażony w kG/m^3).

2.2.3. Ciężar średni kompozytu

Pojęcie to dotyczy kompozytu składającego się z różnych materiałów. Średni ciężar właściwy to ciężar wycinka kompozytu podzielony przez objętość tego wycinka.

2.2.4. Akustyczna oporność falowa (impedancja)

Impedancja (Z) - wielkość charakteryzująca dany materiał. Wyrażona jest wzorem:

$$Z = \rho \cdot c \quad (\text{II})$$

gdzie:

- ρ - gęstość ośrodka,
- c - prędkość rozchodzenia się fali w danym materiale.

2.2.5. Tłumienie materiału, współczynnik tłumienia fali

Tłumienie – zjawisko polegające na osłabieniu amplitudy fali ultradźwiękowej w wyniku rozchodzenia się jej w materiale. Współczynnik tłumienia – wartość zmniejszenia amplitudy fali (wyrażona w dB) przypadająca na jednostkę długości przebytej drogi w danym materiale (w dB/m).

Współczynnik tłumienia zależy od długości fali, struktury materiału, jego własności sprężystych, składu chemicznego i temperatury materiału. Współczynniki tłumienia względnie łatwo się mierzy [3].

2.2.6. Współczynnik odbicia i przenikania

Zjawisko odbicia i przenikania następuje podczas padania fali na granicę dwóch ośrodków o różnych impedancjach falowych. Podczas padania na granicę dwóch ośrodków część energii fali padającej odbija się od granicy tworząc falę odbitą (zjawisko odbicia), a część przenika do drugiego materiału (zjawisko przenikania).

Współczynnik odbicia wyraża liczbowo zmniejszenie energii fali odbitej w odniesieniu do padającej w wyniku zjawiska odbicia (wartość z zakresu 0..1). Współczynnik przenikania wyraża liczbowo zmniejszenie energii fali w wyniku przejścia do innego materiału (wartość z zakresu 0..1). Suma współczynników odbicia i przenikania wynosi 1.

2.2.7. Przestrzeń ziarnista (włóknista) i akustycznie ciągła

Kompozyty należą do grupy materiałów stanowiących celowo dobraną mieszaninę mat szklanych, węglowych itd. klejonych żywicami. Maty tworzą przestrzeń włóknistą w której propagacja fali ultradźwiękowej może być trudna, a nawet niemożliwa. Podobnie jest z wszystkimi naturalnymi przestrzeniami ziarnistymi np. żeliwo, beton itp. Jest to spowodowane tym, że fala ultradźwiękowa trafiając na ziarno lub włókninę może ulegać odbiciu i rozproszeniu. W konsekwencji może to prowadzić do takiego wzrostu tłumienia, że przeprowadzenie jakiegokolwiek badań będzie niemożliwe. Jednak zjawiska rozpraszania nie występują w dwóch przypadkach :

- gdy oporność akustyczna ziaren lub włókien nie różni się od otaczającego ich materiału - zjawisko odbicia fali nie występuje. Fala przenika przez ziarno (włókninę) i nie ma rozproszenia - dla fali materiał jest jednorodny
- gdy długość fali jest wyraźnie większa od wymiaru ziarna (włókniny)

Można zatem sformułować pojęcie przestrzeni akustycznej ciągłej w następujący sposób:

Materiał o strukturze ziarnistej lub włóknistej tworzy przestrzeń akustycznie ciągłą, jeżeli średnica ziaren lub włókien (d) i długość fali (λ) spełniają zależność:

$$\lambda \gg d \quad (\text{III})$$

lub oporność akustyczna ziaren (Z_z) i oporność akustyczna otaczającego je materiału (Z_m) spełniają zależność:

$$Z_z \approx Z_m \quad (\text{IV})$$

W praktyce zależność (III) używa się w postaci bardziej przydatnej to jest:

$$\lambda_{min} = a \cdot d \quad (\text{V})$$

co wyznacza najmniejszą przydatną długość fali (λ_{min}) jako wielokrotność a średnicy włókien d .

Współczynnik a przyjmuje najczęściej wartość 3 lub więcej.

2.3. Dobór sprzętu ultradźwiękowego do badań materiałów kompozytowych

Dobór sprzętu tak, aby dowolny materiał kompozytowy był przestrzenią akustyczną jest złożony. Występuje szeroki zakres uwarunkowań i doborów np.: częstotliwości, mocy nadajników, czułości odbiorników, a wszystko to w obecności szumów, często nieprzewidywalnych. Cały problem można podzielić na trzy części:

- konstrukcyjno - wykonawczy sprzętu (defektoskopy, głowice, wyposażenie),
- kwalifikacje personelu badań,
- badawczy - dobór właściwego gotowego sprzętu i umiejętność jego użycia i kontroli.

Ostatni trzeci problem, który wyłącznie omówimy w tym raporcie jest znacznie prostszy od pozostałych i w zakresie zastosowań do badań mk sprowadza się do doboru głowic i prostych czynności kontrolnych. Zakładając że dobierana głowica ma sprawdzone dopasowanie do posiadanego defektoskopu, co zwykle zapewnia firma dostarczająca równocześnie defektoskop i głowicę, dobór głowic do badania konstrukcji mk to dobór niżej podanych parametrów.

2.3.1. Częstotliwość głowicy

Dobór częstotliwości głowicy do badania mk ma znaczenie podstawowe i polega w pierwszej kolejności na zapewnieniu spełnienia podstawowego warunku (III) przedstawionego w rozdziale 2.2.7. Warunek ten mówi, że nie ma możliwości fizycznej propagacji fali ultradźwiękowej w przestrzeni ziarnistej (włóknistej) w której wielkość ziarna jest większa od długości fali. Oznacza to, że dla kompozytów o większej gramaturze należy dobierać niższą częstotliwość.

Przykład 1:

Według [1] dla laminatów węglowych wykonanych w technologii prepregowej i grubości 0,125 mm (co oznacza, że włókna mają ok. 0,125 mm grubości), użyto głowicy o częstotliwości $f = 5\text{ MHz}$. Stąd przyjęta wielokrotność a według (I) i (V) wynosi:

$$a = \frac{\lambda_{\min}}{d} = \frac{c}{(d \cdot f)} = \frac{2,5}{(0,125 \cdot 5)} = 4$$

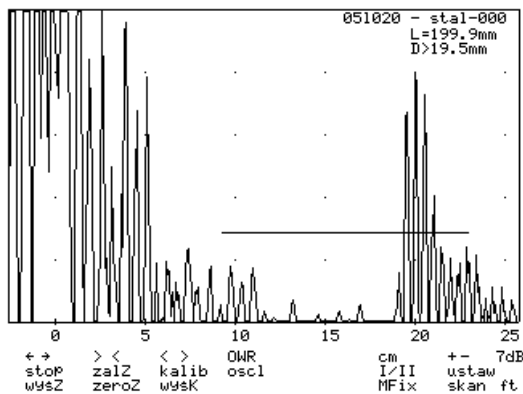
Przykład 2:

Pomierzona prędkość żywicy w posiadanych próbkach kompozytu wyciętego ze zbiornika wynosi ok. 2,5 mm/μs, widoczna średnica włókna ok. 1,2 mm. Zatem częstotliwość głowicy przy krotności $a = 4$ można obliczyć z zależności (I) oraz (V) i wynosi ona:

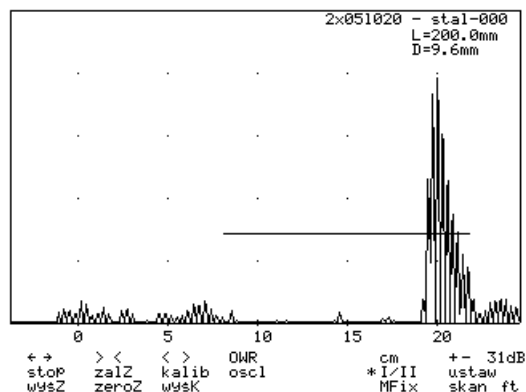
$$f = \frac{c}{(d \cdot a)} = \frac{2,5}{(1,2 \cdot 4)} = 0,52 \text{ MHz}$$

2.3.2. Typ głowicy

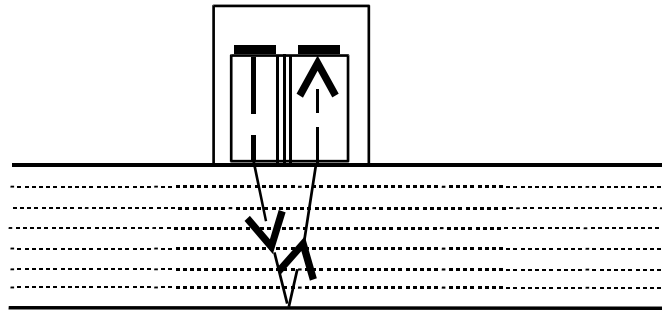
Wyznaczona w przykładzie 2 pożądana częstotliwość głowicy 0,5 MHz jest niska, co znacznie wydłuża strefę martwą głowicy (rys.2). Powoduje to, że dla zakresu badanych grubości kompozytu rzędu kilku lub kilkunastu milimetrów może być użyta tylko głowica podwójna o konstrukcji przedstawionej na rys.4, która nie posiada strefy martwej (rys.3).



Rys.2 Strefa martwa 5cm dla normalnej głowicy 0.5MHz (echo na wzorcu stalowym 200mm).



Rys.3 Widoczny brak strefy martwej dla podwójnej głowicy normalnej 0.5MHz (echo na wzorcu stalowym 200mm)



Rys.4 Konstrukcja i zasada działania podwójnej głowicy normalnej

Budowa takiej głowicy o tak niskiej częstotliwości to unikalne osiągnięcie, możliwe tylko przy zastosowaniu Patentu Nr 60137/70, który opracowano w UDT we Wrocławiu (UDT było jego właścicielem w okresie obowiązującej ochrony patentowej. Zasada tego Patentu została ostatnio przypomniana w [4]. Polega ona na oddzieleniu nadajnika od odbiornika głowicy układem płytek, których grubość (dobierana obliczeniowo) tworzy niezwykle skuteczny układ antyrezonansowy.

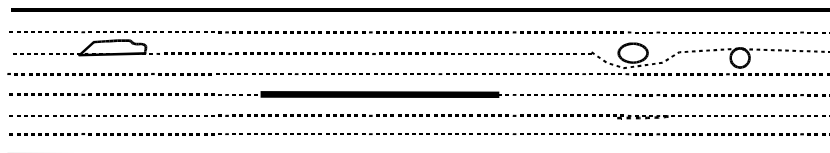
2.3.4. Walidacja badań

W rozdziale 3 podany zostanie zakres wykonywanych badań zbiorników kompozytowych. Badania te sprowadzają się do pomiarów grubości w dużej ilości punktów płaszcza zbiornika. Walidacja tego typu badań jest prosta i polega na okresowych pomiarach kontrolnych na kilku typach wzorców.

3. Ultradźwiękowe badania zbiorników z laminatów i kompozytów

Internetowa przeglądarka norm Polskiego Komitetu Normalizacyjnego nie zawiera norm na badania zbiorników z laminatów i kompozytów. Choć spis norm na badania nieniszczące przekracza sto pozycji, to brak w nim norm na ultradźwiękowe badania laminatów i kompozytów. Można przyjąć, że takich norm nie ma. Spis norm zbliżonych (16 pozycji) załączono. Jednak norma określająca wymogi i kompetencje laboratoriów (6) dopuszcza korzystanie z metod nieznormalizowanych pod warunkiem spełnienia wymogów punktu 5.4.4. normy [10].

3.1. Wady produkcyjne laminatów



Rys.5 Wady produkcyjne laminatów

Rozróżnia się następujące wady produkcyjne laminatów:

- rozwarstwienia - braki połączenia między warstwami laminatu,
- ciała obce za laminowane między warstwami,
- porowatości - resztki powietrza nieusunięte spomiędzy warstw,
- utrata połączeń kohezyjnych między warstwami wskutek: zabrudzenia, niedopuszczalnych zmian technologicznych, przerw w laminowaniu i przy naprawach,
- przekroczenie dopuszczalnych tolerancji zmian grubości.

Wady eksploatacyjne laminatów

Do wad eksploatacyjnych laminatów zalicza się:

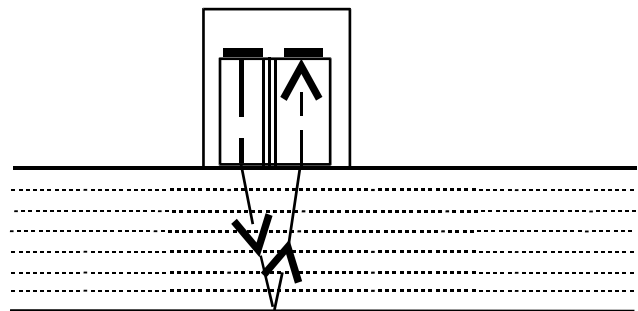
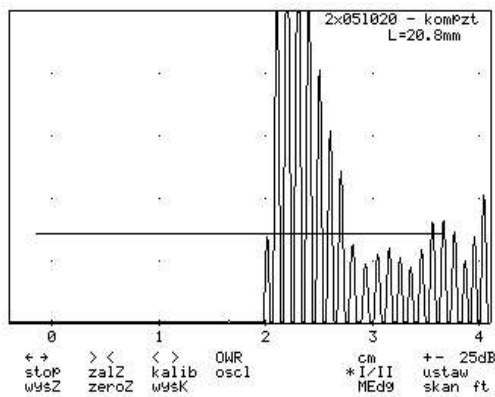
- różnie skonfigurowane pęknięcia,
- wtórne rozwarstwienia w efekcie początkowej utraty połączeń kohezyjnych i ich rozwoju na skutek późniejszych obciążeń,
- ubytki korozyjne i uszkodzenia mechaniczne.



Rys.6 Wady eksploatacyjne laminatów

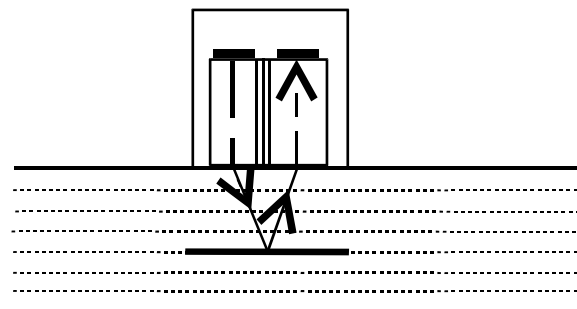
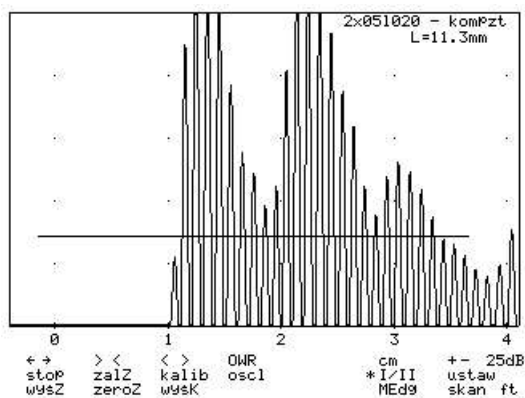
3.3. Technika badań

3.3.1. Badanie w punkcie

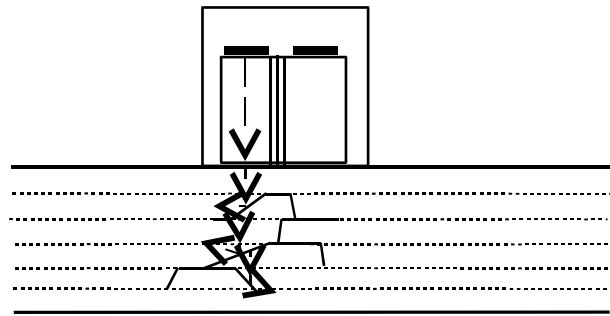
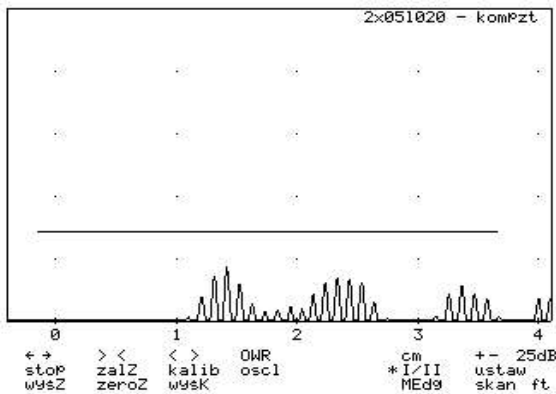


Rys.7 Wskazania na grubości laminatu ok. 20,8 mm w miejscu bez wad

Przedstawione poprzednio (3.1 i 3.2.) typy występujących w laminatach wad wykrywane są typową techniką echa identyczną jak pomiar grubości przy użyciu głowicy podwójnej (rys.3 i rys.7). Poniżej przedstawiono graficznie typowe sytuacje w badaniach i odpowiadające im wskazania na ekranie defektoskopu.



Rys.8 Rozwarstwienie

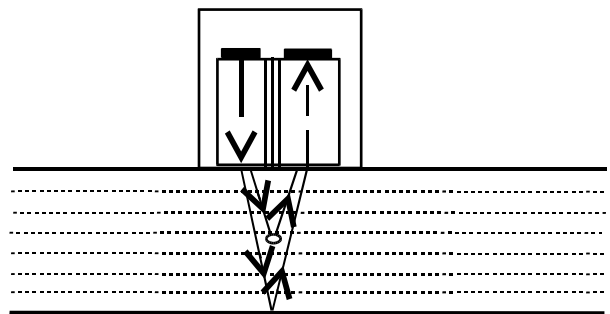
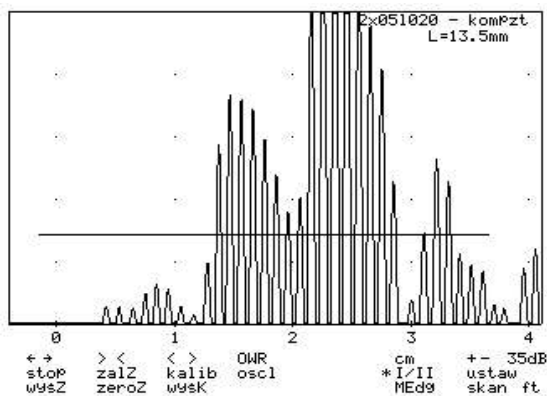


Rys.9 Siatka pęknięć

3.3.2. Wyniki badania w punkcie

Występują cztery możliwe wyniki badania w punkcie:

- echo od powierzchni przeciwległej do głowicy i pomiar grubości (rys.7),
- echo od nieznannej powierzchni pomiędzy (rozwarstwienie) (rys.8),
- brak echa od powierzchni przeciwległej - pojawiające się małe echa szumów (rys.9),
- dwa rozróżnialne echa (odosobnione wtrącenie) (rys.10).



Rys.10 Pojedyncze wtrącenie

3.3.3. Zapis wyników badania w punkcie

Zapis wyników badań w punkcie obejmuje:

- położenie badanego punktu w opisanym przyjętym układzie współrzędnych (np. x, y),
- pomierzona grubość lub wynik c (szumy) lub wynik d (wtrącenia) w tym punkcie.

3.3.4. Siatka badań punktowych

W powiązaniu z przyjętym układzie współrzędnych oraz kryterium oceny zbiornika lub według procedury badań opracowanej dla konkretnej grupy zbiorników wyznacza się siatkę punktów do wykonania badań punkt po punkcie.

3.3.5. Powierzchniowe formy zobrazowania wyników badania (C-scan)

Wyniki zapisane według 3.3.3. wpisuje się do komputera, którego specjalny (dość prosty) program przetwarza, rysuje, archiwizuje, a w miarę potrzeb drukuje mapy powierzchni badanych z naniesionymi wykrytymi wskazaniem wad. Może też dokonywać samoczynnej oceny zbiornika.

3.3.6. Charakterystyka techniki badań poziom A

Zaletami takiego badania są:

- rozpoznanie znacznych powierzchni zbiornika i duża wiarygodność badania,
- mapa wad, archiwizacja,
- znaczne ograniczenie czynnika subiektywnego personelu badawczego.

Wadami takiego badania są:

- duża pracochłonność badań (którą mogłaby istotnie zmniejszyć mechanizacja).

3.4. Technika badań poziom B

Identycznie jak w poziomie A łącznie z punktem 3.3.2., następnie dla każdego osiągniętego wyniku oceniać cały zbiornik na podstawie kryterium przyjętego dla jednego punktu zbadanego. I tak:

- dla wyniku „a” akceptować, o ile stwierdzona grubość jest większa od wymaganej,
- dla wyniku „b” określić akceptowalną powierzchnię rozwarstwienia,
- dla wyniku „c” określić akceptowalną powierzchnię występowania szumów (ostrzej niż dla „b”),
- dla wyniku „d” akceptować.

Sprawozdanie z badania uproszczonego poza opisami podają tylko ogólną ocenę.

4. LITERATURA

- [1] Góra G., Mackiewicz S., *Ultradźwiękowe badania konstrukcji kompozytowych w przemyśle lotniczym*, Jedenaste Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane 2005
- [2] Bełzowski A., *Badanie uszkodzeń zbiornika z laminatu wzmocnionego włóknem szklanym*, Raport Wydziałowego Zakładu Wytrzymałości Materiałów Politechniki Wrocławskiej, seria SPR nr 9, Wrocław 2004
- [3] Michnowski W., *Tłumienie fal ultradźwiękowych*, Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Szczyrk 2001
- [4] Michnowski W., *Badania wzorca odlewu żeliwnego*, wykład wygłoszony na Jedenastym Seminarium Badań Nieniszczących, Zakopane 2005
- [5] Lipnicki M., Szulwach Z., *Podstawy badań ultradźwiękowych*, Materiały szkoleniowe, Gdańsk 1987
- [6] Urząd Dozoru Technicznego, *Warunki techniczne dozoru technicznego. Stałe zbiorniki ciśnieniowe z tworzyw sztucznych*, DT-UC-90/Z
- [7] Urząd Dozoru Technicznego, *Warunki Urzędu Dozoru Technicznego. Urządzenia ciśnieniowe. Stałe zbiorniki ciśnieniowe z tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknem szklanym*, WDT-UC-UTS/01:10.2003
- [8] Urząd Dozoru Technicznego, *Warunki Urzędu Dozoru Technicznego. Urządzenia bezciśnieniowe i niskociśnieniowe*, WDT/ZB/2004
- [9] Bełzowski A., Kamińska A., Stasienko J., Ziółkowski B., *Niektóre kryteria akceptacji defektów w kompozytach na przykładzie laminatu ciętego strumieniem wody*. Kompozyty, nr 4 (2004)
- [10] PN-EN ISO 17025

Spis norm dotyczących materiałów kompozytowych i laminat

stan na dzień 20.05.2005

lp.	Nr normy	Dotyczy
1	PN-EN 2374:1999	Lotnictwo i kosmonautyka. Tworzywa do formowania wzmocniane włóknem szklanym i kompozyty warstwowe. Wytwarzanie płyt do badań
2	PN-EN 12576:2002	Tworzywa sztuczne. Kompozyty wzmocnione włóknem. Przygotowanie płyt do badań z SMC, BMC i DMC metodą prasowania
3	PN-EN 13706-1:2004	Wzmocnione kompozyty tworzywowe. Specyfikacje profili formowanych metodą przeciągania. Część 1: Oznaczenie
4	PN-EN 13706-2:2004	Wzmocnione kompozyty tworzywowe. Specyfikacje profili formowanych metodą przeciągania. Część 2: Metody badań i wymagania ogólne
5	PN-EN 13706-3:2004	Wzmocnione kompozyty tworzywowe. Specyfikacje profili formowanych metodą przeciągania. Część 3: Wymagania szczegółowe
6	PN-EN ISO 14125:2001	Kompozyty tworzywowe wzmocnione włóknem. Oznaczanie właściwości przy zginaniu
7	PN-EN ISO 14125:2001/AC:2003	Kompozyty tworzywowe wzmocnione włóknem. Oznaczanie właściwości przy zginaniu
8	PN-EN ISO 14126:2002	Kompozyty tworzywowe wzmocnione włóknem. Oznaczanie właściwości podczas ściskania równoległe do płaszczyzny laminowania
9	PN-EN ISO 14129:2000	Kompozyty tworzywowe wzmocnione włóknem. Oznaczanie naprężenia ścinającego i odpowiadającego odkształcenia, modułu ścinania i wytrzymałości podczas rozciągania pod kątem +/- 45 stopni
10	PN-EN ISO 14130:2001	Kompozyty tworzywowe wzmocnione włóknem. Oznaczanie umownej wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe metodą krótkiej belki
11	PN-EN 2561:1999	Lotnictwo i kosmonautyka. Tworzywa sztuczne wzmocnione włóknem węglowym. Laminaty jednokierunkowe. Próba rozciągania równoległe do kierunku włókna
12	PN-EN 2562:2001	Lotnictwo i kosmonautyka. Tworzywa sztuczne wzmocnione włóknem węglowym. Laminaty jednokierunkowe. Badanie zginania równoległe do kierunku włókien
13	PN-EN 2563:2000	Lotnictwo i kosmonautyka. Tworzywa sztuczne wzmocnione włóknem węglowym. Laminaty jednokierunkowe. Wyznaczanie umownej wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe
14	PN-EN 2564:2001	Lotnictwo i kosmonautyka. Laminaty z włóknem węglowym. Oznaczanie zawartości włókna, żywicy i części lotnych
15	PN-EN 2597:2001	Lotnictwo i kosmonautyka. Tworzywa sztuczne wzmocnione włóknem węglowym. Laminaty jednokierunkowe. Próba rozciągania prostopadle do kierunku włókna
16	PN-EN ISO 1172:2002	Tworzywa sztuczne wzmocnione włóknem szklanym. Preimpregnaty, tłoczywa i laminaty. Oznaczanie zawartości włókna szklanego i napełniacza mineralnego. Metody kalcynowania