Rafał Szymański*
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Lotnictwa

Wpływ strategii kalibracji badań ultradźwiękowych na wyniki zawartości porowatości w kompozytach polimerowo-węglowych

Effect of ultrasonic testing calibration strategy on porosity content results in polymer-carbon composites

STRESZCZENIE

Artykuł wpisuje się we współczesne zainteresowania firm z branży lotniczej. W artykule wymieniono najczęstsze niezgodności występujące w strukturach kompozytowych powstające zarówno na etapie produkcyjnym jak i eksploatacyjnym. W pracy skupiono się na defekcie typu porowatość, który jest najczęstszą niezgodnością powstającą podczas produkcji elementów kompozytowych. Badania opisane w artykule przeprowadzono na serii płaskich płyt kompozytowych (polimerowo węglowych). Do wykrycia porowatości wykorzystano metodę ultradźwiękową Phased Array. W badaniach wykorzystano dwie różne strategie kalibracji czułości badań ultradźwiękowych: na elemencie badanym oraz na elemencie wzorcowym. Wyniki badań z obu strategii kalibracji porównano z porowatością, którą wyznaczono metodą fizyko-chemiczną oraz optyczną. Na podstawie otrzymanych wyników określono wpływ kalibracji czułości badań ultradźwiękowych na wyniki zawartości porowatości w polimerowych kompozytach węglowych.

***Słowa kluczowe**: porowatość; NDT; ultradźwięki; kompozyty (NDT). ultradźwiękowa, metoda SonReb*

ABSTRACT

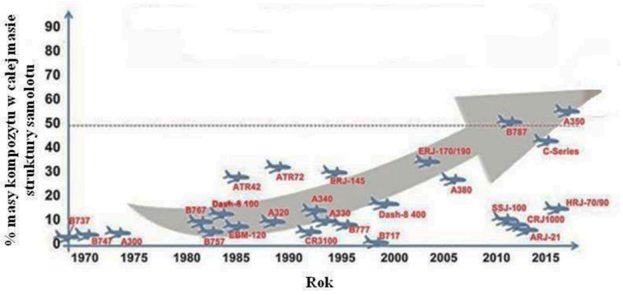
TThe article is in line with the contemporary interests of aerospace companies. The article lists the most common nonconformities occurring in composite structures that occur at both the manufacturing and service stages. The paper focuses on a defect of the porosity type, which is the most common nonconformity generated during the production of composite parts. The tests described in the paper were conducted on a series of flat composite (polymer-carbon) plates. An ultrasonic Phased Array method was used to detect porosity. The study used two different calibration strategies for ultrasonic testing sensitivity: on the test piece and on the reference piece. The test results from both calibration strategies were compared with the porosity, which was determined by physical-chemical and optical methods. Based on the results obtained, the effect of ultrasonic testing sensitivity calibration on the results of porosity content in polymeric carbon composites was determined.

***Keywords**: porosity; NDT; ultrasonic; composite method*

1. Wstęp

Elementy kompozytowe w przemyśle lotniczym pojawiły się w połowie XX wieku. Dzięki swoim właściwością (np. wysokiej wytrzymałości przy niewielkiej masie własnej) szybko znajdywały zastosowanie w coraz odpowiedzialniejszych elementach konstrukcyjnych. Rozwojowi również uległy same materiały kompozytowe które w początkowym etapie występowały głównie w postaci włókien szklanych, rozszerzyły się o włókna węglowe, aramidowe, itp. Wraz z rozwojem materiałów kompozytowych i ich upowszechnianiem, rozwojowi również uległa technologia wytwarzania, procesy projektowania, obliczenia wytrzymałościowe jak i metody kontroli jakości w tym badania nieniszczące struktur kompozytowych [1÷6].

Rozwój i udział procentowy struktur kompozytowych w samolotach przedstawiono na rysunku 1.

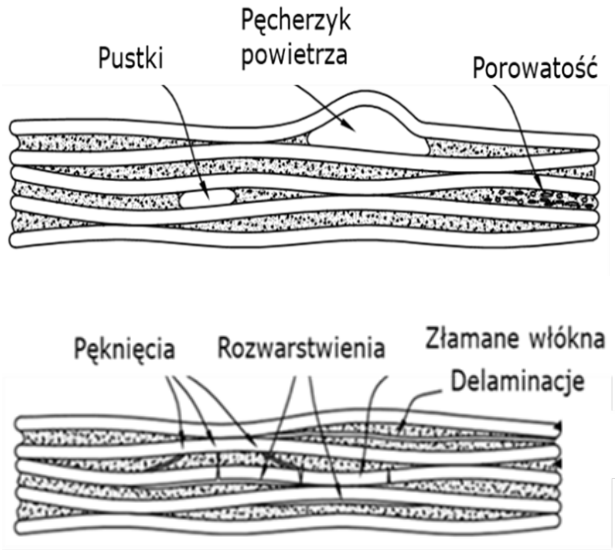


Rys. 1. Procentowy udział masy struktur kompozytowych w całej masie struktury samolotu [7]
Fig. 1. Percentage of weight of composite structures in the total weight of the structure

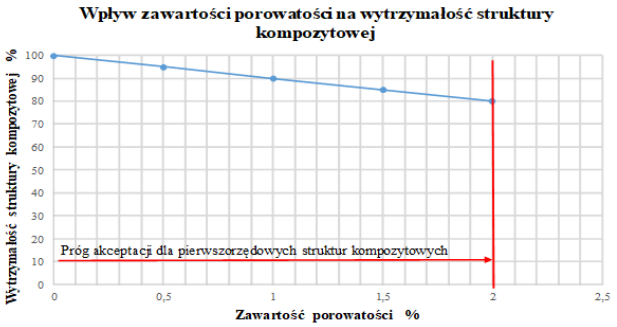
Pomimo wielu zalet jakie niesie ze sobą stosowanie materiału kompozytowego w strukturach lotniczych, materiał ten charakteryzuję się również podatnością na powstawanie różnego typu defektów wpływających bezpośrednio na wytrzymałość wyprodukowanych elementów. Najczęstsze defekty występujące na etapie produkcyjnym to porowatość,

*Autor korespondencyjny.
E-mail: rafal.szymanski@ilot.lukasiewicz.gov.pl

Published by „Badania Nieniszczące i Diagnostyka" Publishing Agenda of SIMP
DOI: 10.26357/BNiD.2024.016



Rys. 2. Typowe defekty występujące w kompozycie monolitycznym [8]
Fig. 2. Typical defects found in a monolithic composite



Rys. 3. Wpływ zawartości porowatości na wytrzymałość (ścinanie) struktury kompozytowej [13]
Fig. 3. Effect of porosity content on shear strength of composite structure [13]

pustki, wtrącenia materiału obcego, delaminacje, itp. [8].

Defekty występujące w strukturach kompozytowych pokazano na rysunku 2.

Obecne technologie wytwarzania struktur kompozytowych są w stanie wyeliminować większość z wymienionych defektów na etapie produkcyjnym. Najtrudniejszym wyzwaniem technologicznym jest wyeliminowanie defektu typu porowatość. Porowatość, czyli mikropęcherze powietrza zalegające w materiale kompozytowym już na etapie produkcji preimpregnatu węglowego oraz powstające na różnych etapach produkcji wyrobu. Eliminacja porowatości możliwa jest na etapie produkcji przy zastosowaniu technologii utwardzania autoklawowego (AC). W technologii autoklawowej stosuje się wysokie ciśnienia (do 10 bar), które powodują rozbicie i wydalenie porowatości z jeszcze nie utwardzonego elementu kompozytowego. Pomimo skutecznego procesu utwardzania elementów kompozytowych w procesie autoklawowym, coraz więcej firm lotniczych odchodzi od tej technologii i skupia się na opracowaniu wytwarzania struktur kompozytowych w technologii bezautoklawowej (OoA) z wykorzystaniem worka próżniowego. Ta tendencja spowodowana jest wysokimi kosztami nie tylko zakupu autoklawu, ale również samego procesu i materiału kompozytowego autoklawowego. Obecnie pomimo że w technologii OoA jest trudniej wyeliminować porowatość, utwardzanie kompozytu w tej technologii jest najczęściej wykorzystywaną technologią na świecie [9÷12].

Stosowanie technologii OoA powoduje konieczność opracowania Kontroli Jakości opierającej się na badaniach nieniszczących zdolnych do wykrycia porowatości. Dodatkowo badania laboratoryjne i symulacje numeryczne wykazały że zawartość porowatości w lokalnej objętości rzędu 2% powoduje spadek wytrzymałości struktury o 20% [13]. W związku z powyższym istotne jest wykrycie i przeprowadzenie prawidłowej oceny porowatości zalegającej w strukturze kompozytowej w tym dobranie właściwego sposobu kalibracji podczas badań ultradźwiękowych.

2. Metodologia

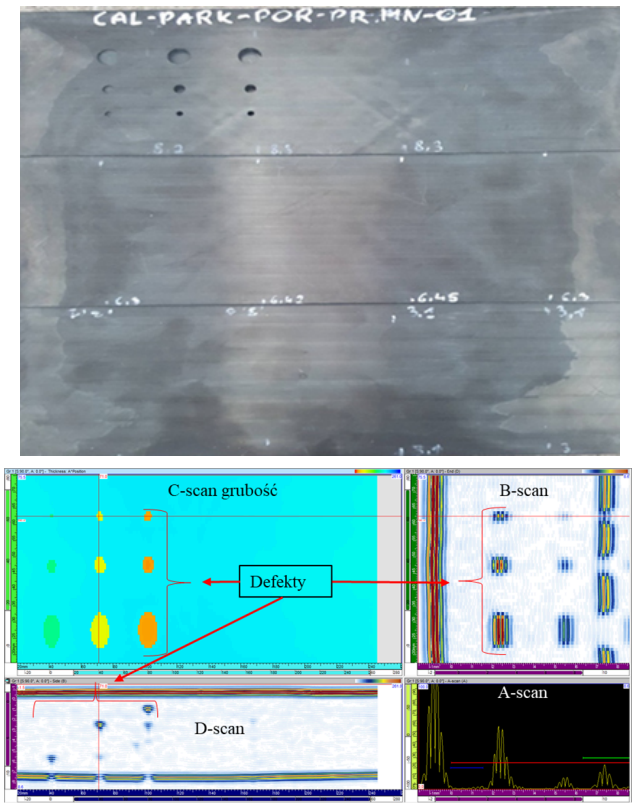
2.1 Wytypowanie paneli do badań oraz produkcja panelu wzorcowego

Do badań ultradźwiękowych wykorzystano istniejące panele kompozytowe, które zostały wyprodukowane na potrzeby opracowania procesu utwardzania preimpregnatu węglowego. Każdy z paneli został wcześniej zbadany metodą ultradźwiękową przy wykorzystaniu głowicy Phased Array. W badaniach indywizdualnie dostosowano czułość dla każdego badanego panelu. Selekcja polegała na znalezieniu paneli, w których sygnał amplitudy echa dna fali ultradźwiękowej świadczył o niejednorodności oraz jednego panelu który potencjalnie był dobrej jakości. Spośród 15 paneli wybrano trzy. Dodatkowo wyprodukowano panel wzorcowy. Jakość panelu wzorcowego została potwierdzona badaniami ultradźwiękowymi oraz mikroskopią cyfrową. Badania wykazały że w najgorszym obszarze panelu wzorcowego porowatość wynosiła 0,07%. Panel wzorcowy pokazano na rysunku 4.

2.2 Opis stanowiska badań oraz parametry badania

W celu przeprowadzenia prac zostało zbudowane stanowisko do badań paneli kompozytowych.

Przygotowanie stanowiska do badań miało na celu kompletację oprzyrządowania oraz elementów pomocniczych w taki sposób, aby powtarzalność poszczególnych badań była możliwie jak najwyższa. Dodatkowo bardzo ważne było, aby podczas badania oraz między nimi została zachowana pozycja bazowa (początkowa) głowicy. Zmiana położenia mogłaby spowodować błędne analizy w następnych etapach prac. Do badań wykorzystano defektoskop ultradźwiękowy, głowicę ultradźwiękową Phased Array 5L64 oraz dwuosiowy skaner położenia. Na rysunku 5 pokazano przygotowane stanowisko do badań



Rys. 4. Panel wzorcowy z płaskodennymi otworami: widok górny panelu kalibracyjnego, 2 – analiza głębokości otworów płaskodennych. Kolorami pokazane są różne głębokości wyfrezowanych otworów oraz najgrubszy obszar panelu
Fig. 4. Calibration panel with flat-bottomed holes: top view of the calibration panel, 2 - depth analysis of flat-bottomed holes. Colors show different depths of milled holes and the thickest area of the panel

Rys. 5. Stanowisko badań ultradźwiękowych

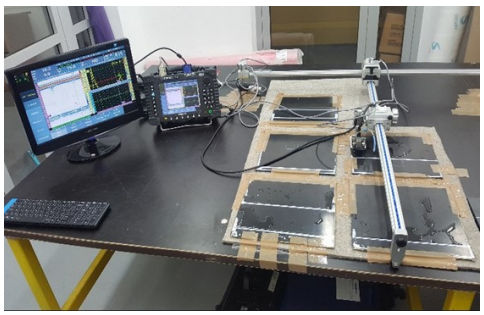


Fig. 5. Ultrasonic test stand

ultradźwiękowych.

Badania ultradźwiękowe zostały wykonane dla dwóch strategii kalibracji:

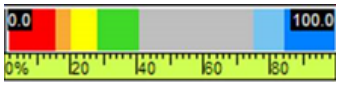
1.Kalibracja na elemencie badanym polegała na znalezieniu najlepszego jakościowo miejsca (miejsca o najwyższej amplitudzie echa dna) na badanym panelu i ustawienie w tym miejscu amplitudy referencyjnej na wysokość 80% FSH. Kalibrację wykonano dla każdego panelu indywidualnie;

2. Kalibracja na elemencie wzorcowym polegała na znalezieniu najlepszego jakościowo miejsca (miejsca o najwyższej amplitudzie echa dna) na wzorcowym panelu i ustawienie w tym miejscu amplitudy referencyjnej na wysokość 80% FSH. Kalibrację wykonano jednorazowo i zbadano wszystkie panele przy tych samych, niezmiennych nastawach aparatury ultradźwiękowej.

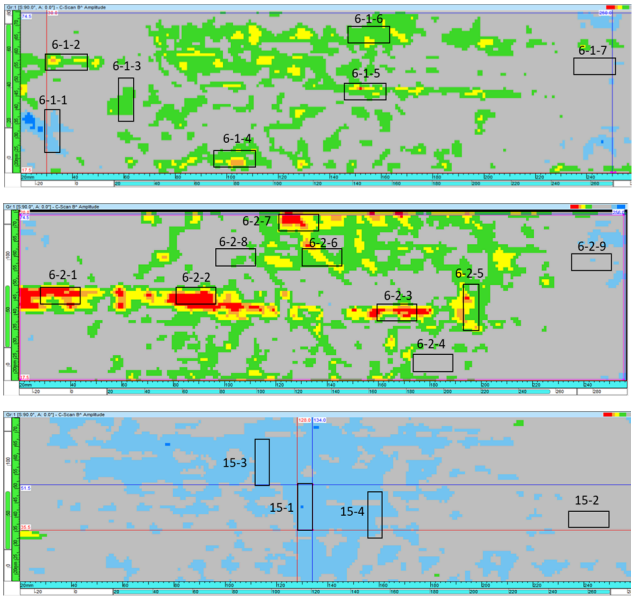
2.3 Wytypowanie obszarów wycięcia próbek przeznaczonych do badań fizyko-chemicznych oraz optycznych

Wytypowanie obszarów do wycięcia próbek przeznaczonych na dalsze badania i analizy zostało przeprowadzone po zakończeniu badań i analiz ultradźwiękowych. We wszystkich przypadkach w próbkach została wyznaczona wysokość sygnału amplitudy echa dna, która stanowiła podstawową informację dla badacza. Łącznie wyznaczono 20 obszarów przeznaczonych na próbki. Na rysunku 6 pokazano zobrazowanie C-Scan badanych płyt z zaznaczeniem rejonów, gdzie dokonano pomiarów porowatości.

Zobrazowania pokazane na rysunku 6 przedstawiają decybelowy spadek amplitudy echa dna według wstępnie ustalonych progów wysokości ekranu defektoskopu (%FSH).



0 – 16% FSH – czerwony – spadek echa -14dB i więcej
16,01 – 20% FSH – pomarańcz - spadek echa od -12dB do -14dB
20,01 – 28,5% FSH – żółty - spadek echa od -9dB do -12dB
28,51 – 40% FSH – zielony – spadek echa od -6dB do -9dB
40,01 – 75% FSH – szary – spadek do -6dB
75,01 – 85% FSH – błękitny – prawidłowa amplituda echa dna
85,01 – 100% FSH – niebieski



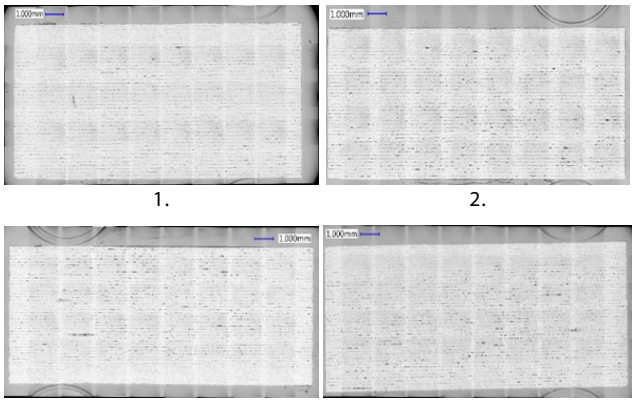
Rys. 6. Zobrazowania C-scan z wyznaczonymi miejscami wycięcia próbek i analizy porowatości: 1 – legenda kolorystyczna wartości amplitudy echa dna, 2 – panel nr. 6.1, 3 - panel nr. 6.2, 4 - panel nr. 15
Fig. 6. C-scan images with determined locations of sample excision and porosity analysis: 1 - color legend of bottom echo amplitude values, 2 - panel no. 6.1, 3 - panel no. 6.2, 4 - panel no. 15

2.4 Wyznaczenie porowatości w wytypowanych próbkach

Z paneli kompozytowych wycięto próbki zgodnie z wytypowanymi obszarami widocznymi na wynikach badań ultradźwiękowych C-scan (przedstawione na rysunku 6). Wycinanie próbek odbyło się na obrabiarce numerycznie sterowanej zgodnie z wyznaczonymi wymiarami i lokalizacją. Do wycięcia próbek kompozytowych użyto specjalnych frezów palcowych węglikowych dedykowanych do obróbki węglowych materiałów kompotowych oraz dobranych doświadczalnie parametrów skrawania, które nie powodują rozwarstwień na etapie wycinania.

Zawartość porowatości w wyciętych próbkach wyznaczono ze zgładów z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego oraz metodą fizyko-chemiczną (Fiber Volume).

Do badań metodą optyczną przekazano 10 próbek kompozytowych. Dla każdej próbki wykonano cztery zobrazowania, poszczególne zobrazowania powstawały przez stopniowe szlifowanie próbki na coraz większą głębokość. Każdorazowo po osiągnięciu zamierzonej głębokości dokonywany był pomiar i analiza porowatości. Podana wartość porowatości jest wartością średnią otrzymaną z czterech przekrojów analizowanej próbki. Przykładowy zgład analizowanej próbki pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Zobrazowanie na mikroskopie: 1 – na powierzchni bazowej, 2 – po przeszlifowaniu 1,5 mm, 3 – po przeszlifowaniu 3 mm, 4 – po przeszlifowaniu 4,5 mm

Fig. 7. Microscope imaging: 1 - on the base surface, 2 - after sanding 1.5 mm, 3 - after sanding 3 mm, 4 - after sanding 4.5 mm

Do badań fizyko-chemicznych przekazano 10 próbek kompozytowych. Badania mające na celu wyznaczenie zawartości powietrza w kompozycie wykonano zgodnie z normą ASTM D3171. Badanie polegało na wyznaczeniu zawartości poszczególnych składników stałych osnowy oraz wzmocnienia w kompozycie polimerowym a zawartość porowatości była wynikiem pośrednim wynikającym z różnicy masowej próbki przed rozpuszczeniem, masy składników rozpuszczonych i masy składników pozostałych po rozpuszczeniu [14, 15].

Wyniki badań porowatości wyznaczonej obiema metodami pokazano w tabeli 1.

Tab. 1. Wyniki badań próbek kompozytowych

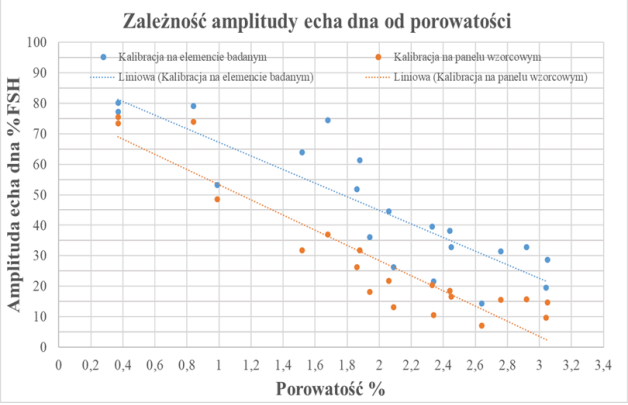
Tab.1. Test results of composite samples

Metoda wyznaczenia porowatości	Numer próbki	Zawartość pustek [%]
Mikroskop	6-1-1	1,68
Mikroskop	6-1-2	2,44
Mikroskop	6-1-3	2,33
Mikroskop	6-1-4	2,45
Fiber volume	6-1-5	1,94
Fiber volume	6-1-6	2,92
Fiber volume	6-1-7	1,88
Mikroskop	6-2-1	3,04
Mikroskop	6-2-2	2,64
Mikroskop	6-2-3	2,09
Mikroskop	6-2-4	1,86
Fiber volume	6-2-5	3,05
Fiber volume	6-2-6	2,76
Fiber volume	6-2-7	2,34
Fiber volume	6-2-8	2,06
Fiber volume	6-2-9	1,52
Mikroskop	15-1-1	0,37
Mikroskop	15-1-2	0,99
Fiber volume	15-1-3	0,84
Fiber volume	15-1-4	0,37

Badania optyczne oraz fizyko-chemiczne potwierdziły różnorodną zawartość porowatości w badanych próbach kompozytowych. Najwyższa wykryta porowatość wyniosła 3,05%, natomiast najniższa 0,37%.

2.5 Wyniki i korelacja badań

Badania ultradźwiękowe wykonano dla 3 różnych paneli kompozytowych z których wycięto i szczegółowo przeanalizowano od 4 do 8 obszarów (próbek). Dla każdej próbki wykonano pomiar amplitudy echa dna fali ultradźwiękowej wyrażonej w procentach pełnego ekranu defektoskopu (%FSH). Zależność między amplitudą echa dna a porowatością dla wszystkich 40 pomiarów przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Zależność między wartościami amplitudy echa dna a porowatością dla wszystkich analizowanych próbek

Fig. 8. Relationship between bottom echo amplitude values and porosity for all samples analyzed

Na wykresie można zauważyć, że wraz ze wzrostem zawartości porowatości zwiększa się rozbieżność wyników badań obu strategii kalibracji.

W tabeli 2 zestawiono wszystkie wyniki analiz.

Tab. 2. Zestawienie wyników badań

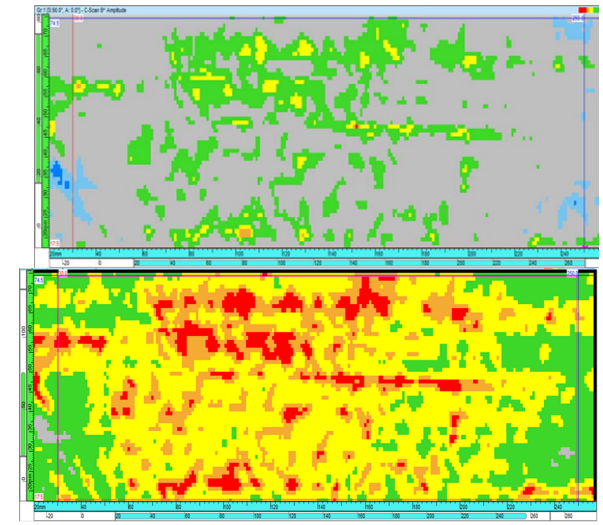
Tab. 2. Summary of test results

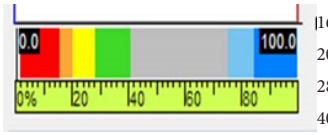
		Metoda kalibracji	Na elemencie badanym	Na panelu wzorcowym
		Wsp. korelacji	-0,865	-0,927
Metoda wyznaczenia porowatości	Numer próbki	Zawartość porowatości [%]	UT [%FSH]	UT [%FSH]
Mikroskop	6-1-1	1,68	74,36	37,03
Mikroskop	6-1-2	2,44	38,23	18,56
Mikroskop	6-1-3	2,33	39,56	20,4
Mikroskop	6-1-4	2,45	32,78	16,65
Fiber volume	6-1-5	1,94	36,02	18,14
Fiber volume	6-1-6	2,92	32,81	15,73
Fiber volume	6-1-7	1,88	61,33	31,75
Mikroskop	6-2-1	3,04	19,49	9,7
Mikroskop	6-2-2	2,64	14,34	7,07
Mikroskop	6-2-3	2,09	26,22	13,16
Mikroskop	6-2-4	1,86	51,75	26,26
Fiber volume	6-2-5	3,05	28,73	14,69
Fiber volume	6-2-6	2,76	31,52	15,64
Fiber volume	6-2-7	2,34	21,68	10,53
Fiber volume	6-2-8	2,06	44,52	21,8
Fiber volume	6-2-9	1,52	63,88	31,77
Mikroskop	15-1-1	0,37	80,11	75,42
Mikroskop	15-1-2	0,99	53,2	48,53
Fiber volume	15-1-3	0,84	79,02	73,91
Fiber volume	15-1-4	0,37	77,24	73,46

W tabeli podano również obliczony współczynnik korelacji pomiędzy zawartością porowatości a zmierzoną amplitudą echa dna. Obliczona dla obu metod kalibracji korelacja jest ujemna – co świadczy o tym, że wzrost porowatości skutkuje spadkiem amplitudy echa. Korelacja wyników badań dla strategii kalibracji na elemencie badanym wyniosła -0,865, natomiast dla kalibracja na panelu wzorcowym -0,927.

W lotnictwie dla pierwszorzędowych struktur kompozytowych progiem akceptacji jest maksymalna zawartość porowatości równa 2%. W przypadku badań poprzedzonych kalibracją na elemencie badanym porowatość 2% występuje dla 45% FSH, natomiast dla kalibracji na panelu wzorcowym porowatość 2% została ustalona na poziomie 27% FSH. Powyższe poziomy są progami akceptacji dla badanych elementów kompozytowych. Na rysunku 9 przedstawiono wyniki porowatości w funkcji amplitudy echa dna (%FSH) dla obu strategii kalibracji.

Wyniki badań ultradźwiękowych które poprzedzone były kalibracją na elemencie badanym charakteryzują się wysokimi wartościami amplitudy echa dna. Zawyżone wartości amplitudy mogłyby powodować akceptacje wadliwych elementów kompozytowych. Różnica wyników badań dla tego samego panelu wykonana dwiema metodami kalibracji została przedstawiona na rysunku 10.

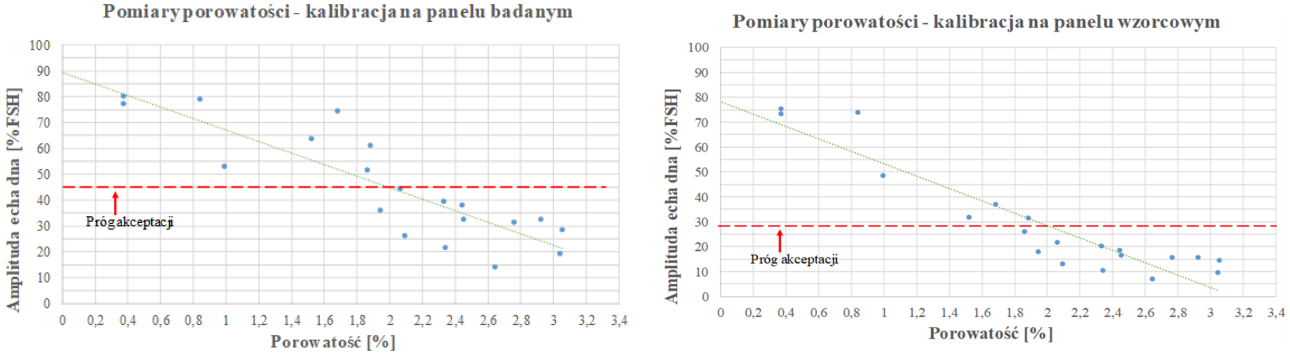




0 ÷ 16% FSH – czerwony
16,01 ÷ 20% FSH – pomarańcz
20,01 ÷ 28,5% FSH – żółty
28,51 ÷ 40% FSH – zielony
40,01 ÷ 75% FSH – szary
75,01 ÷ 83% FSH – błękitny
83,01 ÷ 100% FSH – niebieski

Rys. 10. Porównanie wskazań ultradźwiękowych uzyskanych przy różnych strategiach kalibracji: 1 – kalibracja na elemencie badanym, 2 – kalibracja na wzorcu, 3 - legenda kolorystyczna wartości amplitudy echa dna

Fig. 10. Comparison of ultrasonic indications obtained with different calibration strategies: 1 - calibration on the test piece, 2 - calibration on the standard, 3 - color legend of the bottom echo amplitude values



Rys. 9. Zależność amplitudy echa dna od porowatości: 1- strategia kalibracji na obiekcie badanym, 2 – strategia kalibracji na panelu wzorcowym

Fig. 9. Relationship of bottom echo amplitude to porosity: 1- calibration strategy on test object, 2 - calibration strategy on reference panel

3. Podsumowanie

Przeprowadzone i opisane w artykule badania wykazały, że do oceny jedynie niejednorodności elementu kompozytowego, lepszą strategią kalibracji jest kalibracja na elemencie badanym, którą otrzymano (w porównaniu z drugą strategią) czytelniejsze zobrazowania C-scan. Jest to szczególnie ważne przy mocno niejednorodnych elementach kompozytowych. W przypadku zastosowania strategii kalibracji na elemencie badanym, otrzymane wyniki nie mogą być porównywane z badaniami innych elementów o tej samej budowie strukturalnej. Badania ultradźwiękowe poprzedzone kalibracją na elemencie badanym charakteryzowały się niską powtarzalnością wyników oraz silną korelacją otrzymanych wyników badań metody ultradźwiękowej z mikroskopią cyfrową i fiber volume. Niska powtarzalność wyników dla tej strategii kalibracji wynika z faktu że amplituda referencyjna (80% FSH) dla trzech paneli badanych uzyskiwana była przy różnych wartościach wzmocnienia. Dodatkowo amplitudę referencyjną powinno się ustawić w najlepszym jakościowo miejscu, gdzie straty sygnału są najniższe. Znalezienie takiego miejsca szczególnie dla panelu charakteryzującego się dużą niejednorodnością jest bardzo trudne. Silna korelacja nie jest wystarczająca w badaniach nieniszczących lotniczych struktur kompozytowych. Dodatkowo wyniki badań charakteryzowały się zawyżonymi wartościami amplitudy echa dna co w konsekwencji mogłoby doprowadzić do akceptacji wadliwego produktu.

Chcąc porównać wyniki badań ultradźwiękowych różnych elementów o tej samej budowie strukturalnej, konieczne jest posiadanie wzorca (odniesienia) na którym należy w pierwszym etapie badań przeprowadzić kalibrację. Badania ultradźwiękowe kompozytowych struktur lotniczych mające na celu ocenę jakościową oraz ilościową porowatości powinny być poprzedzone o kalibrację aparatury na wzorcach. Wyniki badań poprzedzone o kalibrację aparatury ultradźwiękowej na wzorcach, charakteryzowały się bardzo silną korelacją z wynikami porowatości otrzymanymi z badań mikroskopii cyfrowej oraz fiber volume.

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz otrzymanych wyników rekomenduje się przeprowadzanie badań ultradźwiękowych struktur kompozytowych poprzedzonych kalibracją na panelu kalibracyjnym. Badania te charakteryzują się powtarzalnością i umożliwiają porównanie badanych paneli kompozytowych ze sobą przy zachowaniu tych samych warunków badania.

4. Literatura

[1] J. Wang, A. Baker, P. Chang, Hybrid approaches for aircraft primary structure repairs, Elsevier Composite Structures 207, s. 190, 2019.
[2] D. W. Radford, T. S. Rennick, Separating sources of manufacturing distortion in laminated composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, tom 19, s. 621, 2000.
[3] C. Dong, A parametric study on the process-induced deformation of composite T-stiffener structures, Composites: Part A, tom 41, s. 515, 2010.
[4] A. Arafath, Efficient numerical techniques for predicting process-induced stresses and deformations in composite structures, PhD Thesis, University of British Columbia, s. 6–7, 2007.
[5] S. Wijskamp, Shape distortions in composite forming, PhD Thesis, University of Twente, Enschede, s. 1–2, 2005.
[6] M. Brillant, Out-of-autoclave Manufacturing of Complex Shape Composite Laminates, MSc thesis, Department of Mechanical Engineering, McGill University, Canada, s. 17–18, 2010.
[7] A. Ghobadi, Common Type of Damages in Composites and Their Inspections, World Journal of Mechanics, 2017, 7, s. 25.
[8] R. Unnthorsson, M. P. Jonsson, T. P. Runarsson, NDT Methods for Evaluating Carbon Fibre Composites, Comptest, University of Bristol, s. 4–5, 2004.
[9] U. P. Breuer, Commercial Aircraft Composite Technology, Springer International Publishing AG Switzerland, s. 81–84, 2018.
[10] M. Chun-Yu Niu, Composite Airframe Structures, Hong Kong Conmilit Press, s. 186–189, 2010.
[11] J. Schlimachs, A. Ogale, Out-of-autoclave curing process in polymer matrix composites, Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs), s. 440–442, 2012.
[12] J. Lee, X. Ni, F. Daso, X. Xiao, D. King, J. S. Gomez, T.B. Varela, S. S. Kessler, B. L. Wardle, Advanced carbon fiber composite out-of-autoclave laminate manufacture via nanostructured out-of-oven conductive curing, Composites Science and Technology 166, s. 151–152, 2018.
[13] Military handbook 17-3F, Volume 3, Chapter 7, s. 29, 2002.
[14] A. Stępniowska, Wpływ wybranych parametrów na poprawność przeprowadzenia badań zawartości składników stałych w materiale kompozytowym, Prace Instytutu Lotnictwa, tom 3 (244), s. 148–149, 2016.
[15] S.R. Ghiorse, A comparison of void measurement methods for carbon/epoxy composites, U.S. Army Materials Technology Laboratory, s. 2–4, 1991.