

# **WPŁYW POROWATOŚCI W KOMPOZYTACH WĘGLOWYCH NA TŁUMIENIE FAL ULTRADŹWIĘKOWYCH.**

**Tomasz Katz, katz@ilot.edu.pl**

**INSTYTUT LOTNICTWA**

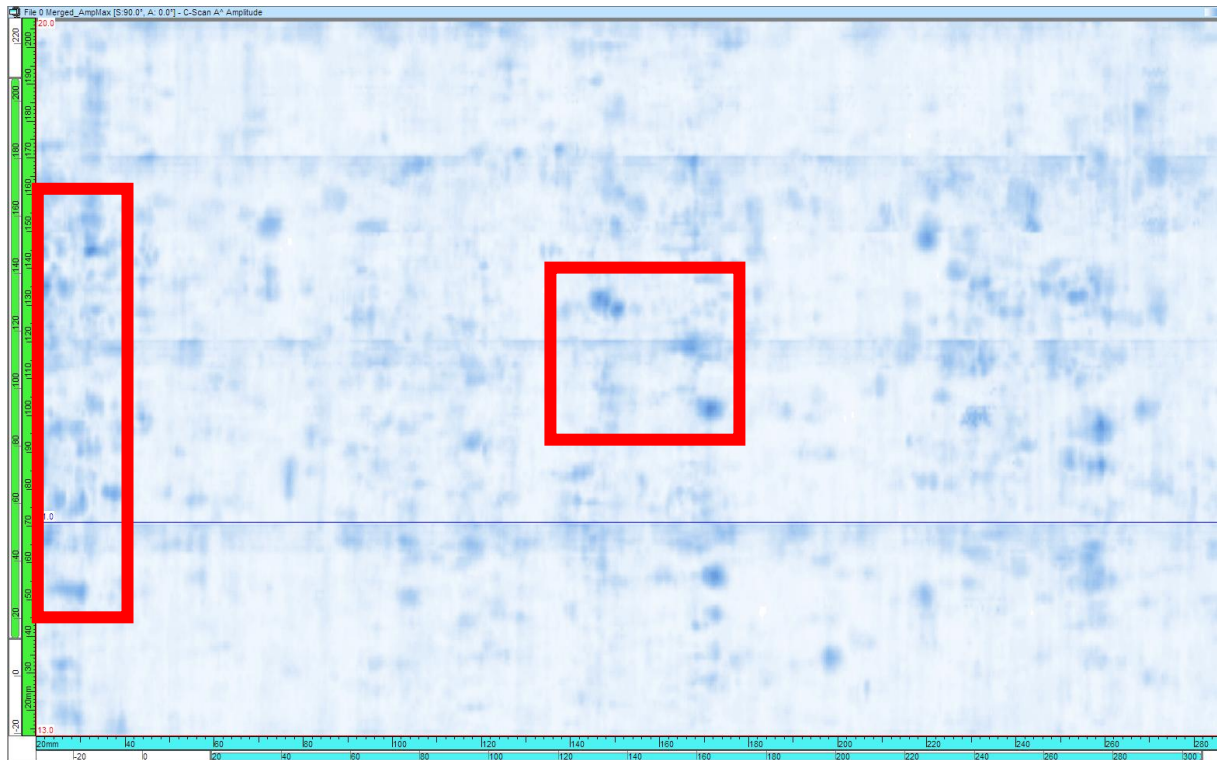
## **1. WSTĘP**

Artykuł ma na celu przedstawienie wpływu wady typu porowatość na tłumienie fali ultradźwiękowej dla kompozytów węglowych wytworzonych w technologii OoA (Out of Autoclave). Badania nieniszczące w metodzie ultradźwiękowej powszechnie używane w Polsce i na świecie wykorzystywane są do badań elementów, struktur oraz materiałów wykonanych z kompozytów węglowych. Popularną metodą wytwarzania kompozytów węglowych jest metoda „na mokro”, polegająca na ręcznym nasycaniu włókien węglowych żywicą epoksydową. Metoda ta stosowana jest globalnie w przemyśle lotniczym jak i motoryzacyjnym, pomimo tego, że elementy tak wykonane są trudno badalne metodami ultradźwiękowymi. Kolejną powszechną metodą jest technika wytwarzania kompozytów przy pomocy preimpregnatów utwardzanych w autoklawach. Wyroby wytworzone tą techniką cechują się niskim tłumieniem materiału, a przez to bardzo dobrymi zdolnościami badawczymi w metodzie ultradźwiękowej. Istotną wadą tej technologii są wysokie koszty zakupu i eksploatacji pieców ciśnieniowych. Nowe materiały OoA cechuje łatwość wytwarzania elementów kompozytowych przy użyciu preimpregnatów bez konieczności używania pieców ciśnieniowych. Badania przeprowadzone w ramach artykułu odnoszą się do preimpregnatu bez autoklawowego MTM46 firmy Cytec i pokazują jak porowatość w objętości materiału wpływa na spadek echa dna badanego materiału kompozytowego.

## **2. BADANIA NIENISZCZĄCE METODĄ ULTRADŹWIĘKOWĄ**

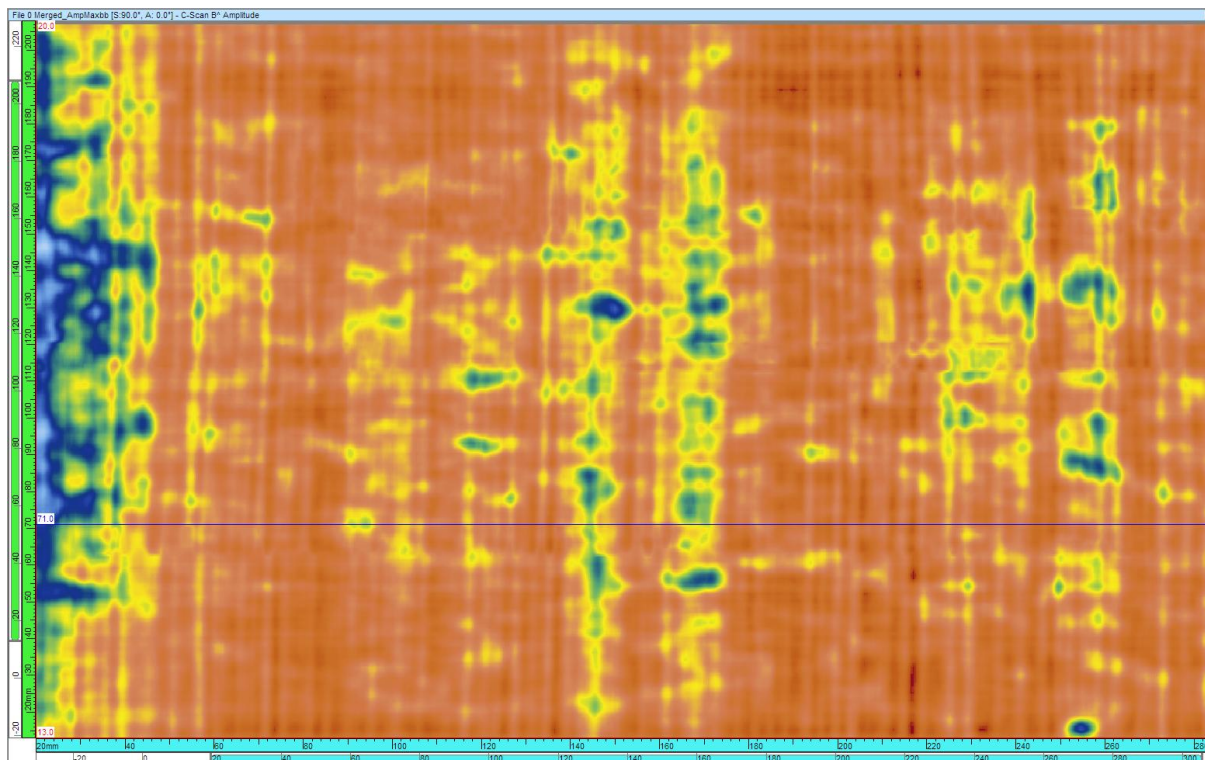
Badania nieniszczące metodą ultradźwiękową struktur kompozytowych mają głównie na celu wykrycie delaminacji. Do tego typu wad zaliczają się rozwarstwienia, wtrącenie oraz niedoklejenia. W ramach badań kompozytów rejestruje się spadek amplitudy echa dna, w celu wykrycia wady typu porowatość. Wada ta nie daje echa w zobrażowaniu amplitudowym dla metody Pulse-echo, a w metodzie przepuszczania powoduje spadek amplitudy podobny do delaminacji. Tak przebadane elementy poddaje się ocenie zarejestrowanych wskazań. Zarejestrowane wartości amplitudy nie niosą jednak informacji o tym, jak duża jest objętość porowatości w badanej próbce. Badania ultradźwiękowe techniką Phased Array przy częstotliwości głowicy 5MHz przeprowadzone w Instytucie Lotnictwa miały na celu wytypowanie odpowiednich próbek ze wskazaniem na obecność

wad typu porowatość. Do badań użyto 6 płyt wykonanych z kompozytu węglowego o wymiarach 350x275x3mm. Liczba warstw preimpregnatu węglowego wynosiła 21. Wszystkie warstwy ułożone zostały w kierunku „0”. Wady typu porowatość uzyskiwano poprzez zmniejszenie podciśnienia podczas procesu produkcji elementów z laminatów węglowych w zakresie od -0.1 do -0.95 bara.



Rys.1. Zobrazowanie amplitudowe typu C płyty LK13-50.

Zobrazowanie typu C-skan jednej z wytypowanych płyt do badań przedstawia rys.1. Wysokość amplitudy w technice Pulse-echo nie wskazuje na obecność niedopuszczalnych wad w badanej próbce. Obszar zaznaczony w czerwonych ramkach na rysunku 1 wskazuje miejsca echa pochodzących od niejednorodności. Obszar ten nie został dopuszczony do dalszych badań mających na celu określenie procentowej zawartości porów w próbce, ze względu na zbyt wysoki poziom amplitudy echa. Do określenia obszaru, w którym znajdują się skupiska drobnych porów, czyli wady mikrostruktury laminatu, gdzie fala ultradźwiękowa może ulec tłumieniu bądź rozproszeniu, badane próbki były oceniane w zobrazowaniu typu C amplitudy echa dna przedstawionej na rysunku 2. Skupiska bardzo drobnych porów nie odbijają fal ultradźwiękowych. Na poniższym zobrazowaniu widać centralną oraz lewą i prawą stronę próbki, gdzie spadek echa dna może świadczyć o skupiskach porów.



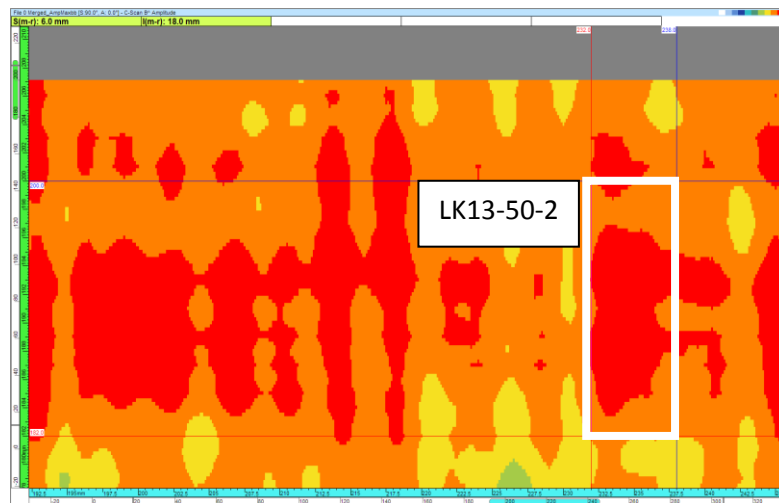
Rys.2. Zobrazowanie amplitudowe echa dna typu C płyty LK13-50.

Kolejnym krokiem było wytypowanie miejsc na wycięcie 20-tu próbek o wymiarze 6x18mm. Każda z nich powinna mieć stałą amplitudę echa dna, różną od pozostałych próbek. Różnice amplitud między poszczególnymi próbkami pozwolą na określenie zależności między porowatością, a tłumieniem fali ultradźwiękowej.

### 3. INTERPRETACJA WYNIKÓW BADAŃ ULTRADŹWIĘKOWYCH W ŚWIETLE WYNIKÓW BADAŃ METODĄ TOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ.

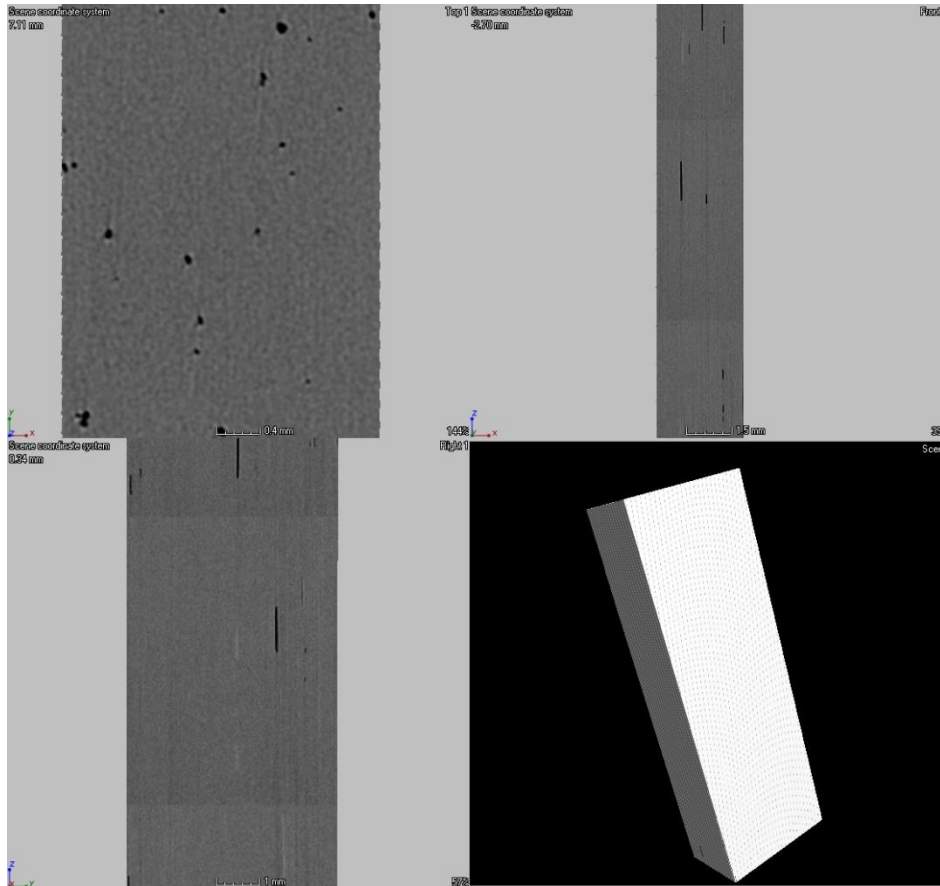
Badania tomograficzne na potrzeby określenia zawartości porów wykonano w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych na 20 próbkach laminatu węglowego o wymiarach 6x18x3mm. Próbkę wycięto z 6 płyt w miejscach wytypowanych na podstawie wyników badań ultradźwiękowych. Przy badaniach zastosowano następujące parametry pracy tomografu: napięcie 80kV, natężenie 80 $\mu$ A, rozmiar voxela 11 $\mu$ m, powiększenie 17x. Porowatość była interpretowana jako porowatość wewnętrzna (bez tzw. otwartych pęcherzy). Próg oceny (threshold) był określany wartością grayvalue – ustaloną indywidualnie przez operatora dla danej próbki. Jest to wartość bezwymiarowa dobierana graficznie, optycznie w oparciu o histogram, różnicę w odcieniach szarości na danym monitorze. Interpretacja wyników podana została na przykładzie próbki LK13-50-2, której zobrazowanie ultradźwiękowe pokazuje rysunek 3. W badaniu ultradźwiękowym techniką Phased Array przy pomocy metody Pulse-echo obserwuje się równy rozkład amplitudy echa dna próbki LK13-50-2.

Zarejestrowane wyniki pokazują, że średnia amplitudy dla całej powierzchni próbki wynosi 86.5% FSH, a odchylenie standardowe dla tego samego obszaru wynosi 4.1%. W tym konkretnym przypadku mówimy o próbce bardzo dobrej jakości, która powinna cechować się niską zawartością porów w objętości.



Rys.3. Zobrazowanie amplitudowe echa dna próbki LK13-50-2 wytypowanej do badań porowatości przy pomocy tomografii komputerowej.

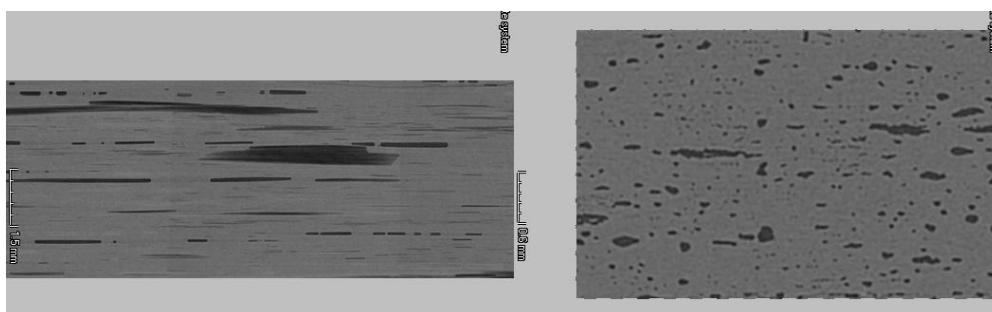
Uzyskane przekroje tomograficzne potwierdzają wstępną interpretację wyników badań ultradźwiękowych, co do tego, iż brak spadku amplitudy echa dna przekłada się na niską zawartość porów. Dla próbki LK13-50-2 zbadana wartość porowatości wyniosła 0,38% przy błędzie pomiarowym 0,12%.



Rys.4. Typowe przekroje tomograficzne próbki LK13-50-2.

Wybrane przekroje tomograficzne próbki LK13-50-2 wykonane w różnych przekrojach pokazane są na rysunku 4. Poprzeczny przekrój próbki pokazuje lokalizacje porów i pustek rozłożonych równomiernie w badanym materiale.

Badania przeprowadzone na kolejnych próbkach przy użyciu tomografu komputerowego potwierdzają spadek echa dna, który powodowany jest przez wady mikrostruktury laminatu węglowego.



Rys.5. Wzdłużny i poprzeczny przekrój tomograficzny próbki LK13-38-3.

Pustki występują seriami na jednej głębokości materiału i mają one spłaszczony kształt w kierunku grubości (patrz rys. 5). Sugeruje to, że są one pęcherzykami powietrza nieusuniętymi spomiędzy

warstw preimpregnatu podczas układania laminatu. Wyniki badania ultradźwiękowego dla próbek LK13-38-3 pokazują, że średnia wartość amplitudy echa dna wynosi 9,1% FSH przy odchyleniu standardowym 3,1%, co odpowiada spadkowi echa dna w granicach 19dB. Pustki widoczne na zobrazowaniu poprzecznym rysunku 5 mogą mieć związek np. z niejednorodnym rozkładem włókien węglowych w objętości preimpregnatu. Pasma preimpregnatu o zbyt małej zawartości żywicy mogą mieć tendencję do gorszego łączenia się z warstwami laminatu leżącymi powyżej i poniżej, a w efekcie powodować wady typu rozwarstwienia, które dają wyraźne wskazania ultradźwiękowe.

#### 4. WYNIKI

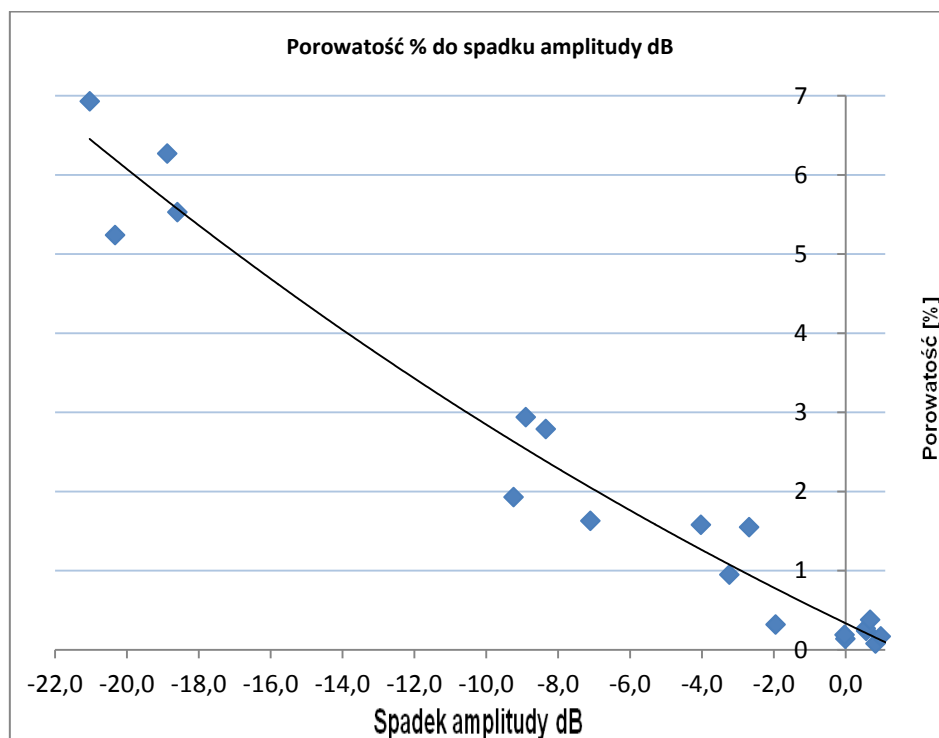
Zbiorczy wynik badań przedstawia tabela 1, w której kolumnach podane są numery próbek, wyniki pomiaru porowatości i błędu pomiarowego dla sekcji badań tomografem komputerowym, a następnie wyniki pomiaru średniej wartości amplitudy oraz odchylenia standardowego dla sekcji badań ultradźwiękowych. Ostatnia kolumna podaje wartość podciśnienia użytego w procesie produkcji laminatu węglowego.

| Próbka     | Badania tomograficzne |                | Badania ultradźwiękowe |                          |                  |
|------------|-----------------------|----------------|------------------------|--------------------------|------------------|
|            | Porowatość %          | Błąd pomiaru % | Amplituda dB           | Odchylenie standardowe % | Podciśnienie bar |
| LK13-44_6  | 0,080                 | 0,1            | 0,8                    | 2,7                      | -0,96            |
| LK13-50_3  | 0,100                 | 0,1            | 1,1                    | 2,9                      | -0,96            |
| LK13-44_3  | 0,140                 | 0,12           | 0,0                    | 3,6                      | -0,96            |
| LK13-50_9  | 0,170                 | 0,08           | 1,0                    | 4,3                      | -0,96            |
| LK13-44_4  | 0,190                 | 0,06           | 0,0                    | 5,6                      | -0,96            |
| LK13-44_5  | 0,240                 | 0,14           | 0,6                    | 2,2                      | -0,96            |
| LK13-50_6  | 0,270                 | 0,18           | 0,6                    | 4,4                      | -0,96            |
| LK13-44_1  | 0,320                 | 0,14           | -2,0                   | 6,3                      | -0,96            |
| LK13-50_2  | 0,380                 | 0,12           | 0,7                    | 4,1                      | -0,96            |
| LK13-39_2  | 0,950                 | 0,22           | -3,2                   | 4,8                      | -0,8             |
| LK13-39_9  | 1,550                 | 0,34           | -2,7                   | 11,1                     | -0,8             |
| LK13-36_3  | 1,580                 | 0,22           | -4,0                   | 6,3                      | -0,4             |
| LK13-40_2  | 1,630                 | 0,28           | -7,1                   | 5,7                      | -0,6             |
| LK13-40_1  | 1,930                 | 0,5            | -9,2                   | 8,4                      | -0,6             |
| LK13-36_9  | 2,790                 | 0,32           | -8,3                   | 8,3                      | -0,4             |
| LK13-36_10 | 2,940                 | 0,3            | -8,9                   | 4,9                      | -0,4             |
| LK13-38_2  | 5,240                 | 0,38           | -20,3                  | 2,3                      | -0,1             |
| LK13-38_1  | 5,530                 | 0,48           | -18,6                  | 2,7                      | -0,1             |
| LK13-38_3  | 6,270                 | 0,44           | -18,9                  | 3,1                      | -0,1             |
| LK13-38_4  | 6,930                 | 0,4            | -21,0                  | 2                        | -0,1             |

Tab.1. Wyniki badań tomografem komputerowym wraz z wynikami badań ultradźwiękowych.

Powyższa tabela z wynikami badań dla 20 próbek przedstawia powiązanie między wzrostem porowatości, a spadkiem echa dna. Analiza wskazuje na powstałą lukę w danych między porowatością, a spadkiem echa dna na poziomie od 10 do 18 dB. Wynika to z faktu, iż mimo starań odpowiedniego doboru próbek nie udało się wytypować obszaru, który posiadałby spadek echa dna

w żądanym przedziale. Poniższy wykres 1 przedstawia procentową zawartość porów w badanych próbkach, w stosunku do wartości spadku amplitudy. Widać na nim, że 7 dB spadek amplitudy odpowiada niemal 2% zawartości porów w laminacie węglowym MTM 46. Wzrost porowatości do 3% objętości w materiale to już niemal 11 dB spadek amplitudy echa. Wyniki te świadczą o tym, jak dużym problemem dla badań nieniszczących w metodzie ultradźwiękowej są porowatości w materiałach kompozytowych. Spadek echa o 18 dB wskazuje na około 5% zawartość porów, co przy tym poziomie amplitudy często uniemożliwia przeprowadzenie badania ultradźwiękowego z racji maskowania echa wady w sygnale szumu pochodzącego od struktury badanego laminatu.



Wykres 1. Wartość porowatości do spadku amplitudy echa dna.

## 5. PODSUMOWANIE

Badania metodą tomografii komputerowej wykazały dużą przydatność ze względu na pogłębienie interpretacji wyników badań ultradźwiękowych, dzięki możliwości charakteryzowania mikrostruktury laminatu węglowego.

Większość nieciągłości wykrytych w badanych próbkach miała charakter pustek i porów o różnym kształcie i wielkości. Zestawienie wyników z badań ultradźwiękowych i tomografii pokazało zależność wzrostu tłumienia amplitudy w stosunku do wzrostu zawartości porowatości dla materiału MTM46, który należy do grupy preimpregnatów Out of Autoclave.

Pragnę podziękować Instytutowi Technicznemu Wojsk Lotniczych za przeprowadzenie badań tomografii komputerowej oraz inż. Piotrowi Koperniakowi z Instytutu Lotnictwa za wyniki badań tomografii komputerowej.

#### LITERATURA

1. S. Mackiewicz, G. Góra, Ultradźwiękowe badania konstrukcji kompozytowych w przemyśle lotniczym, Materiały XI Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane 8-11 marca 2005,
2. W. Manaj, G. Wojas, M. Szwed, A. Zagorski, M. Spychalski, K.J. Kurzydłowski, Badania ultradźwiękowe z zastosowaniem głowic wieloprzetwornikowych - system Phased Array, Materiały XI Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów” , Zakopane 13-16 marca 2007,
3. K. Dragan., Zastosowania głowic Phased Array w diagnostyce konstrukcji lotniczych, Materiały XVII Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów” , Zakopane 08-11 marca 2011,
4. Hillger W., Ultrasonic Imaging of Internal Defects In CFRP-Composites, Proceedings of 6th European Conference on Non Destructive Testing, Nice 94, pp 449-261-453,
5. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications., R/D Tech Guideline., 2004, 2005, 2007 by Olympus NDT.