

Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

Modern material technologies in aerospace industry

Metaliczne materiały kompozytowe w aplikacjach lotniczych w tym materiały typu Glare Composite metallic materials in aviation applications (including Glare-type materials)

Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Politechnika Śląska, Instytut Lotnictwa w Warszawie
Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk

Wyniki badań Results

Identyfikacja parametrów modelowych materiału porowatego o sztywnym szkielecie na podstawie krzywych impedancji akustycznej wyznaczonych doświadczalnie dla pianek ceramicznych o porowatości 90%

Parameter identification of rigid-frame porous material model based on experimentally determined curves of acoustic impedance for ceramic foams of porosity 90%

Celem badań było sformułowanie i przetestowanie zadania odwrotnego identyfikacji parametrów akustycznego modelu materiału porowatego o sztywnym szkielecie. Dla potrzeb tego zadania przeformulowano model wprowadzając parametry bezwymiarowe jednoznacznie powiązane z oryginalnymi parametrami modelu. Procedurę identyfikacyjną oparto na algorytmie optymalizacyjnym dopasowującym krzywe impedancji akustycznej warstwy materiału porowatego wyznaczone doświadczalnie oraz obliczone analitycznie (wykorzystując równania modelu). Metodę sprawdzono identyfikując poprawnie parametry dla pianki ceramicznej tlenku glinu Al₂O₃ o porowatości 90%, której dwie próbki o różnej wysokości przebadano pod względem impedancji akustycznej oraz współczynnika pochłaniania dźwięku, stosując tzw. dwu-mikrofonową metodę funkcji przejścia.

The investigation purpose was to formulate and test the inverse problem of parameter identification for an acoustic model of rigid-frame porous material. To this end, a specific set of dimensionless parameters related to the actual model parameters was defined. The identification procedure involved an optimization algorithm matching the acoustic impedance curves measured for a layer of porous material with the relevant curves calculated from the model equations. The method was successfully tested by carrying out a correct identification of parameters for a ceramic foam Al₂O₃ with porosity 90%; for this purpose, two different-height samples of such foam were examined with respect to their acoustic impedance and absorption coefficient, using the so-called two-microphone transfer function method.

Parametry modelu materiału porowatego o sztywnym szkielecie Parameters of the rigid-frame model of porous material

Identyfikację odwrotną wykonano dla zaawansowanego i uznanego modelu Johnson-Champoux-Allard. Model ten zakłada, że szkielet materiału porowatego jest sztywny, jednakże parametry i równania zaproponowane przez ten model są również wykorzystywane do modelowania materiałów poro-sprężystych, uzupełniając w tym celu teorię Biot'a poro-sprężystości. Model Johnson-Champoux-Allard wykorzystuje 6 (a w wersji rozszerzonej nawet 8) parametrów „geometrycznych”, które przedstawiono w Tabeli 1. Jest to lista niezależnych parametrów, które wynikają tylko z geometrii szkieletu materiału porowatego. Potrzebne są oczywiście również dodatkowe parametry, które charakteryzują płyn wypełniający pory (zazwyczaj jest to powietrze), jednakże te parametry (jak gęstość, lepkość kinematyczna, liczba Prandtla itp.) są znane lub łatwo wyznaczalne w zależności od ciśnienia i temperatury otoczenia.

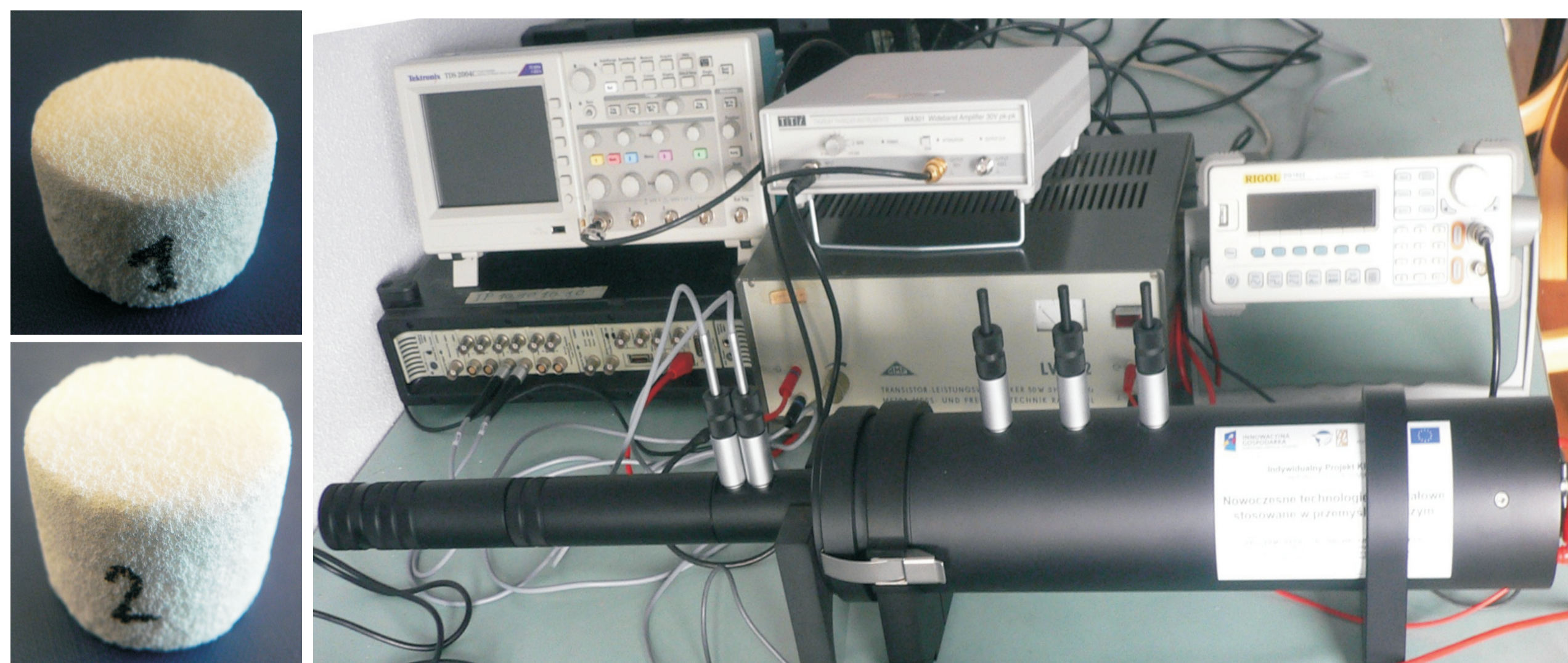
W celu przeprowadzenia identyfikacji odwrotnej istotnym krokiem było wprowadzenie zastępczych przeskalowanych parametrów bezwymiarowych, do zdefiniowania których zaproponowano dodatkowo określenie dwóch częstotliwości referencyjnych: jednej dla efektów lepkości, a drugiej dla efektów termicznych.

Tabela 1: Parametry szkieletu materiału porowatego dla modelu Johnson-Champoux-Allard
Table 1: Parameters of porous material skeleton for the Johnson-Champoux-Allard model

| Symbol | Unit Jednostka | Parameter | Parametr |
|-----------------|-------------------|-------------------------------|---|
| ϕ | [-] | porosity | porowatość |
| α_∞ | [-] | tortuosity | krętość (struktury porów) |
| k_0 | [m ²] | (static) viscous permeability | przepuszczalność (statyczna) lepka |
| k'_0 | [m ²] | “thermal permeability” | „przepuszczalność termiczna” |
| Λ | [m] | viscous characteristic length | długość charakterystyczna dla efektów lepkości |
| Λ' | [m] | thermal characteristic length | długość charakterystyczna dla efektów termicznych |

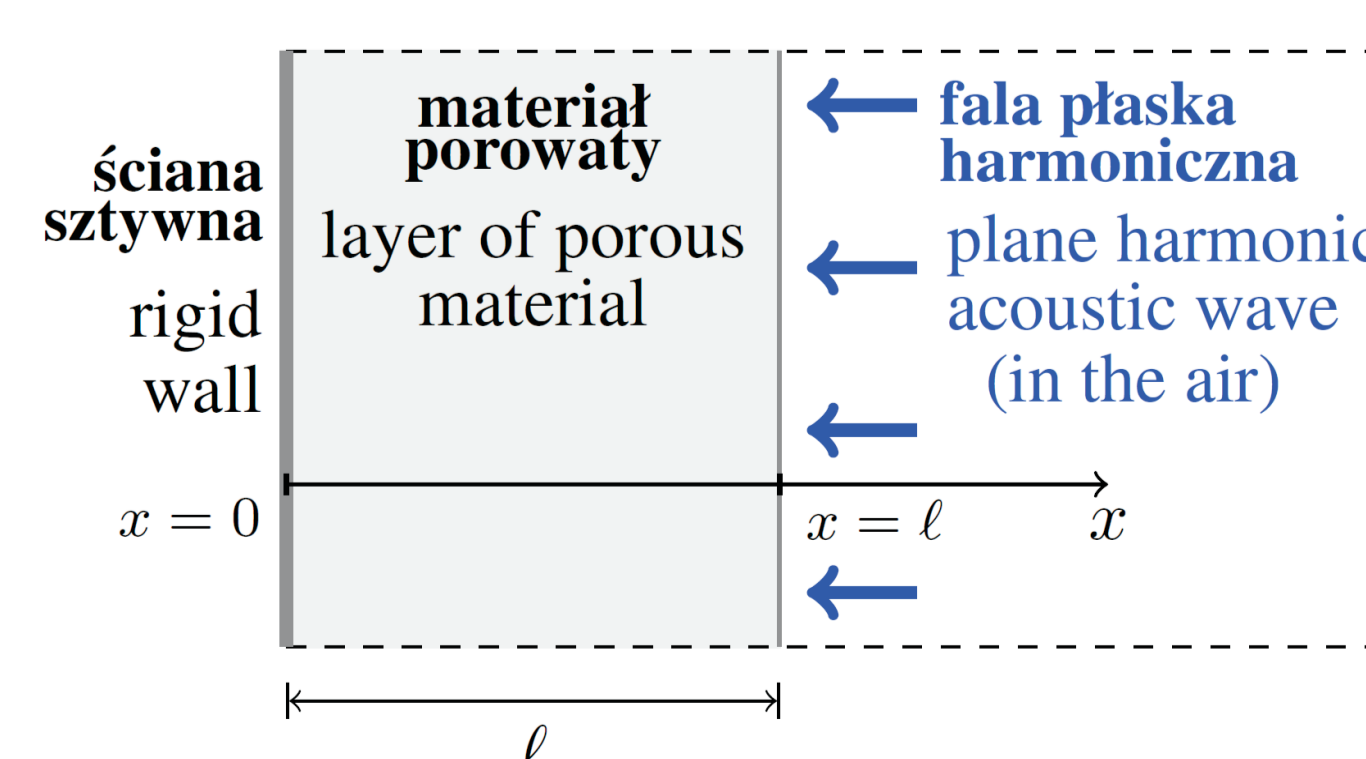
Impedancja akustyczna – pomiary i obliczenia analityczne Acoustic impedance – measurements and analytical calculations

Z korundowej pianki ceramicznej o znanej porowatości 90%, wykonano dwie próbki w kształcie cylindrów o średnicy 29mm i wysokościach: 18mm oraz 24mm (rys.1). Próbki posłużyły do wyznaczenia charakterystyk impedancji akustycznej oraz dźwiękochłonności w zakresie częstotliwości od 500Hz do 6.4kHz. W tym celu zastosowano dwu-mikrofonową metodę funkcji przejścia, wykorzystując system pomiarowy zaprezentowany na rys.1, którego podstawę stanowi zestaw rury impedancyjnej oraz analizator PULSE firmy Brüel&Kjaer. Pomierzone charakterystyki posłużyły do identyfikacji parametrów modelu Johnson-Champoux-Allard, jak również weryfikacji wyników identyfikacji.



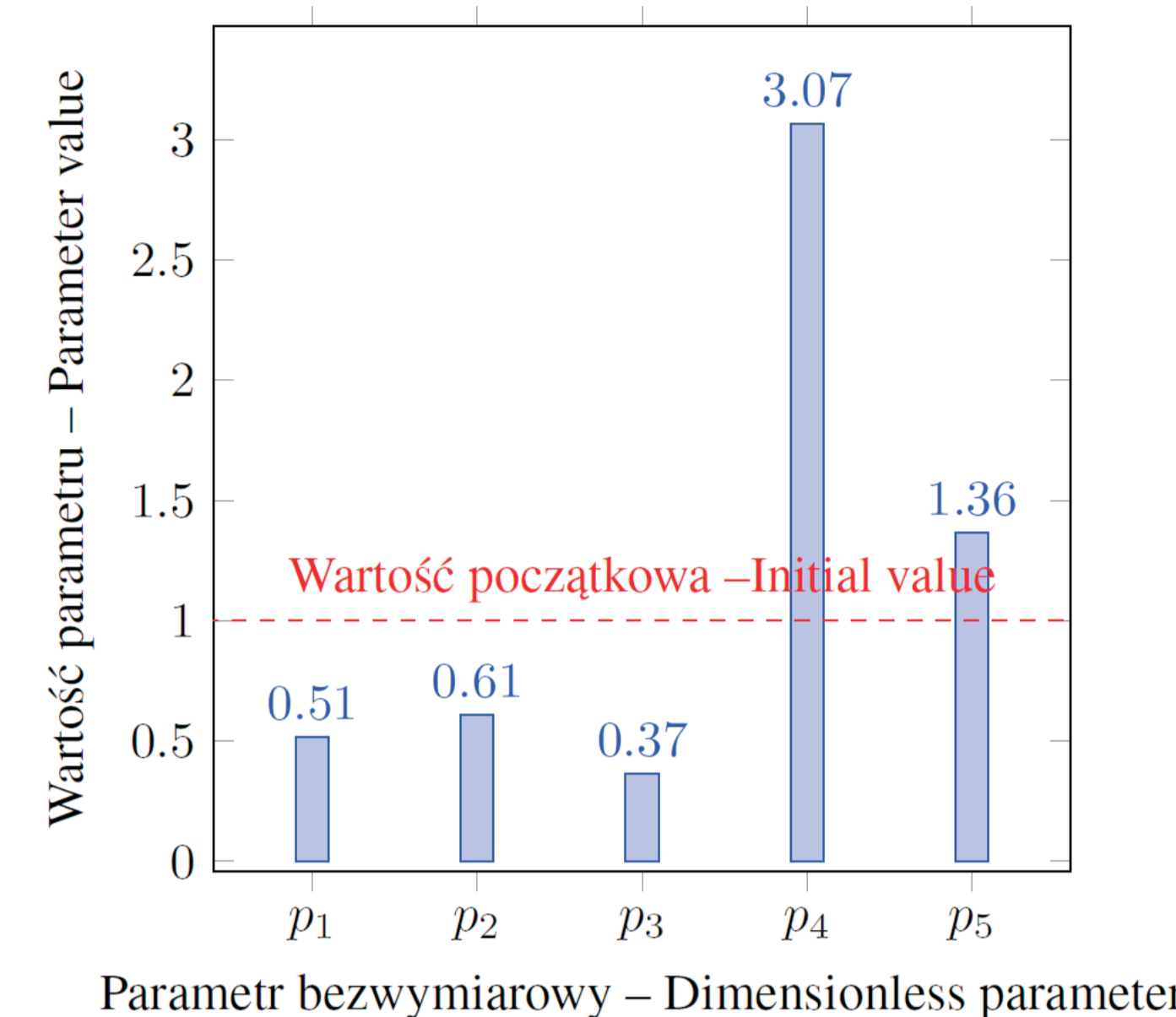
Rys.1: Próbki ceramiki porowatej oraz system do pomiaru impedancji i absorpcji akustycznej
Fig.1: Porous ceramic samples and the measurement system for acoustic impedance and absorption

Rysunek 2 prezentuje konfigurację, która odpowiada doświadczeniu przeprowadzanemu w rurze impedancyjnej. Dla tak sformułowanego problemu propagacji fali płaskiej wyznaczono analitycznie formuły do obliczania impedancji akustycznej (jak również współczynnika odbicia i absorpcji) dla materiału porowatego wykorzystując model Johnson-Champoux-Allard. Formuły te wykorzystano następnie w ramach procedury identyfikacyjnej.



Rys.2: Konfiguracja materiału przy wyznaczaniu impedancji
Fig.2: Material setup to determine the acoustic impedance

Identyfikacja odwrotna parametrów modelu Inverse identification of model parameters



Rys.3: Zidentyfikowane parametry bezwymiarowe
Fig.3: The identified dimensionless parameters

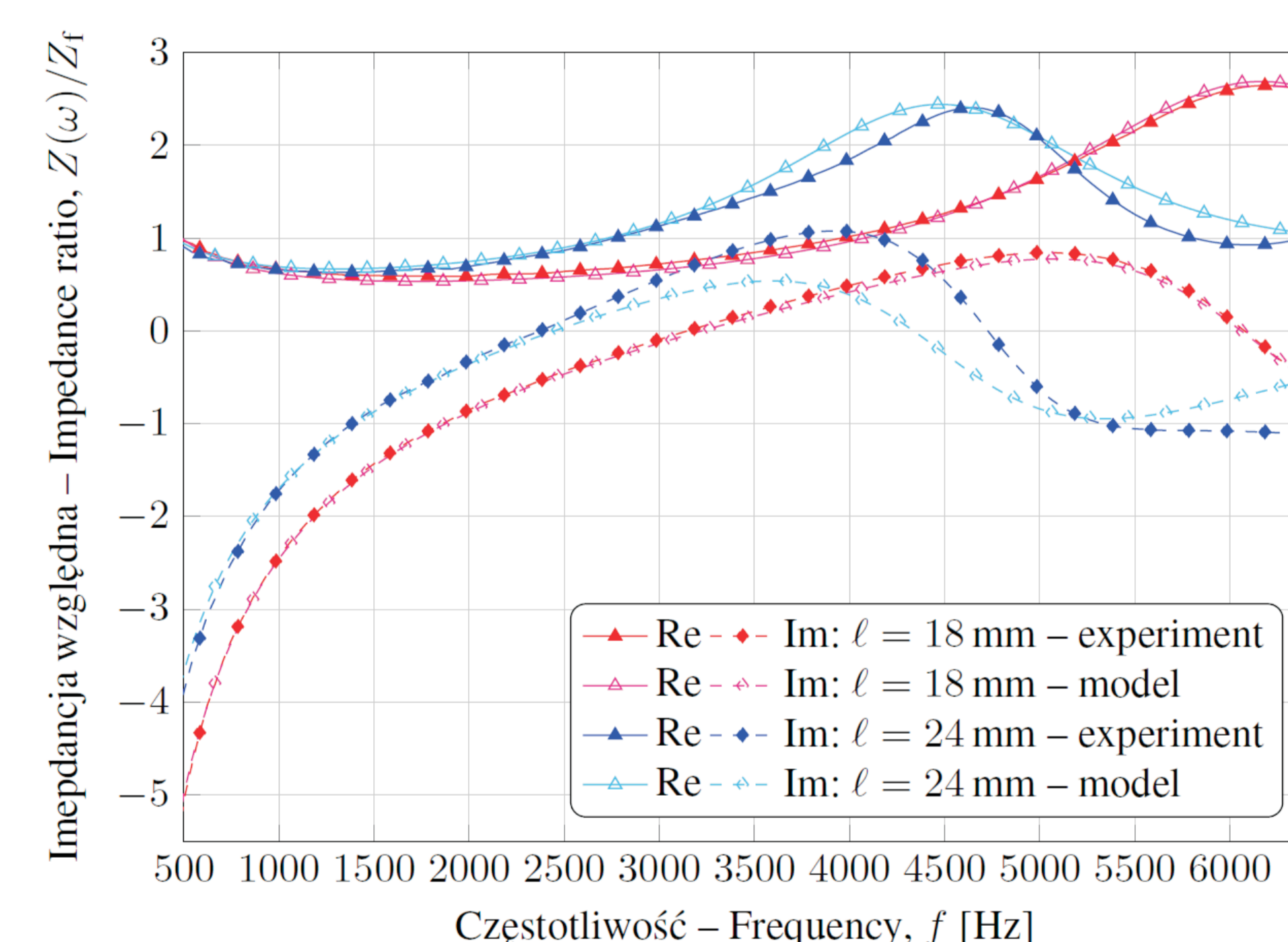
Dla pianki ceramicznej Al₂O₃ wykonano identyfikację odwrotną parametrów modelu Johnson-Champoux-Allard za pomocą algorytmu optymalizacyjnego dopasowującego krzywe impedancji wyznaczone doświadczalnie (pomiar metodą funkcji przejścia) oraz obliczone analitycznie (wykorzystując równania modelu). Identyfikacji dokonano dla próbki o wysokości 18mm, natomiast wyniki pomiarów doświadczalnych otrzymane dla próbki o wysokości 24mm wykorzystano w celach weryfikacyjnych. M.in. ze względu na to, że porowatość materiału jest znana (90%) i dokładnie określona, zidentyfikowano jednocześnie tylko pozostałe 5 parametrów. Rysunek 3 prezentuje zidentyfikowane parametry bezwymiarowe, natomiast odpowiadające im parametry modelu, charakteryzujące makroskopowo geometrię szkieletu pianki ceramicznej, zamieszczono w Tabeli 2.

Tabela 2: Początkowe (a) i zidentyfikowane (b) wartości parametrów modelu oraz ich stosunek (c)
Table 2: The initial (a) and identified (b) values of model parameters, and the relevant ratios (c)

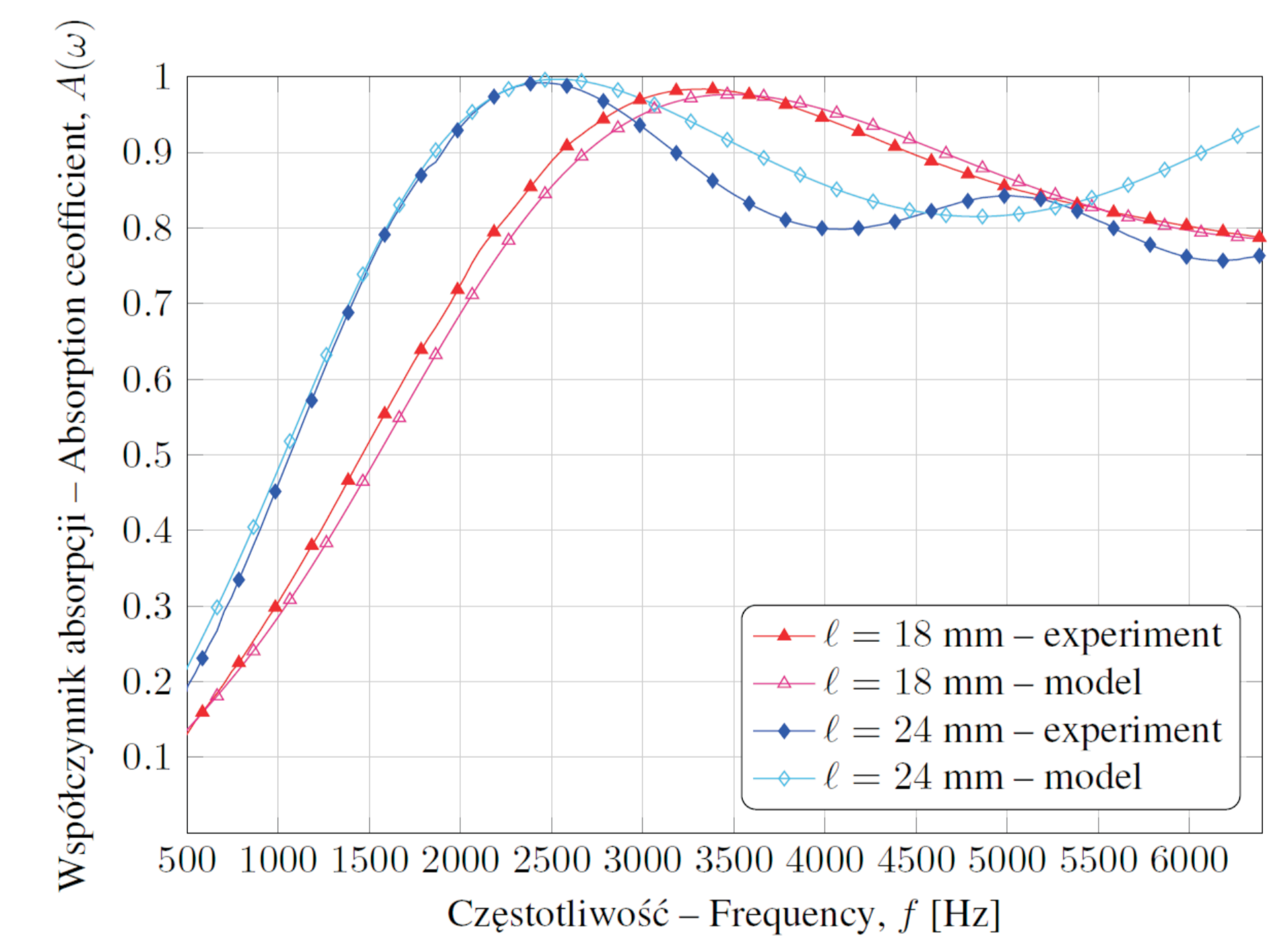
| | α_∞ | k_0 [m ²] | k'_0 [m ²] | Λ [m] | Λ' [m] |
|------------------|-----------------|-------------------------|--------------------------|---------------|----------------|
| (a) | 2.0000e+000 | 4.3456e-010 | 3.0603e-009 | 8.7895e-005 | 1.1662e-004 |
| (b) | 1.5149e+000 | 7.1304e-010 | 8.3739e-009 | 6.2392e-005 | 2.7323e-004 |
| Ratio (b) to (a) | | | | | |
| (c) | 0.76 | 1.64 | 2.74 | 0.71 | 2.34 |

Weryfikacja wyników identyfikacji Validation of the results of identification

Rysunki 4 i 5 prezentują krzywe impedancji akustycznej oraz współczynnika dźwiękochłonności otrzymane dla obu próbek pianki korundowej o porowatości 90%. Na rys.4 wartości impedancji – zarówno jej części rzeczywistej jak i urojonej – podane są względem charakterystycznej impedancji powietrza (jest to wielkość stała i rzeczywista), wypełniającego pory pianki. Łatwo zauważyć znakomitą zgodność pomiędzy krzywymi impedancji pomierzonej i obliczonej z modelu dla próbki o wysokości 18mm, gdyż właśnie dla tych krzywych dokonywana była identyfikacja parametrów modelu. Zidentyfikowane parametry wykorzystano następnie również do obliczenia impedancji i dźwiękochłonności dla próbki o wysokości 24mm, a dobra zgodność w ten sposób wyznaczonych krzywych z odpowiednimi wynikami pomiarów świadczy o poprawności identyfikacji. Drugim czynnikiem weryfikującym było bardzo istotne spostrzeżenie, że zidentyfikowany parametr długości charakterystycznej dla efektów termicznych jest porównywalny ze – znanym dla pianki ceramicznej o porowatości 90% – średnim promieniem porów, zaś długość charakterystyczna dla efektów lepkości jest bliska średniemu promieniowi „okien” łączących pory. Właśnie takie interpretacje dla tych wielkości nadaje model Johnson-Champoux-Allard w przypadku komórkowych materiałów porowatych o otwartej strukturze porów!



Rys.4: Impedancja akustyczna – wyniki eksperymentu i modelowanie
Fig.4: Acoustic impedance – experimental results and modelling



Rys.5: Dźwiękochłonność – wyniki eksperymentu i modelowanie
Fig.5: Acoustic absorption – experimental results and modelling

Wnioski Conclusions

Możliwa jest stabilna identyfikacja odwrotna parametrów dla modelu Johnson-Champoux-Allard materiału porowatego o sztywnym szkielecie. Niezbędne jest jednak wprowadzenie odpowiednio przeskalowanych parametrów bezwymiarowych jednoznacznie powiązanych z oryginalnymi parametrami modelu. Poprawność identyfikacji parametrów modelu dla ceramicznej pianki Al₂O₃ potwierdzona jest dodatkowo przez zgodność dwóch zidentyfikowanych parametrów z odpowiednimi wielkościami charakteryzującymi jej mikrostrukturę, a mianowicie średnimi wielkościami porów i „okien” łączących pory.

A robust inverse identification of parameters for the Johnson-Champoux-Allard model of rigid-frame porous materials is feasible, however, it requires that a specific set of dimensionless parameters related to the actual model parameters must be used. The model parameters for a ceramic foam Al₂O₃ are correctly identified which is also confirmed by the consistence of two identified parameters with some relevant geometric quantities that characterize the skeleton microstructure, namely, the average sizes of pores and “windows” linking the pores.

Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

Publikacje

Zielinski T.G., Galland M.-A., Ichchou M.N.: "Fully-coupled finite-element modeling of active sandwich panels with poroelastic core". Journal of Vibration and Acoustics - Transactions of the ASME, Vol.134, No.2, pp.021007-1-10, 2012. (doi:10.1115/1.4005026)