

dr inż. Jan Radosz<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0001-8542-7799

# Effect of manufacturing tolerances and structural randomness on the sound transmission attenuation of channel-based sonic crystal barriers

*Wpływ tolerancji wykonawczych oraz losowości strukturalnej na tłumienie przenoszenia dźwięku w kanałowych barierach z kryształów dźwiękowych*

DOI: 10.15199/33.2026.05.04

**Abstract.** The study analyzes the effect of manufacturing tolerances and structural randomness on the sound transmission loss of channel-based acoustic barriers based on sonic crystals and locally resonant sonic crystals. The analyses were carried out using three-dimensional FEM models developed in COMSOL Multiphysics for a structure of cylindrical scatterers placed inside a duct. A reference configuration without apertures and a resonant configuration with a single circular aperture of 3 mm diameter were considered, with individual geometric deviations introduced to represent realistic tolerances associated with FDM 3D printing (PLA) and conventional workshop fabrication of aluminum elements. The results indicate that structures operating in the Bragg band exhibit high resistance to small manufacturing tolerances, whereas resonant structures are significantly more sensitive.

**Keywords:** sonic crystals; sound transmission attenuation; acoustic barriers; Helmholtz resonators; noise.

**Streszczenie.** W artykule przeanalizowano wpływ tolerancji wykonawczych i losowości strukturalnej na tłumienie przenoszenia dźwięku w kanałowych barierach akustycznych na bazie kryształów dźwiękowych oraz lokalnie rezonujących kryształów dźwiękowych. Analizy wykonano z wykorzystaniem trójwymiarowych modeli FEM w środowisku COMSOL Multiphysics, dotyczącym struktury cylindrycznych rozpraszaczy umieszczonych w kanale. Rozpatrzono wariant referencyjny bez otworów oraz wariant z pojedynczym otworem rezonansowym o średnicy 3 mm, wprowadzając indywidualne odchyłki geometryczne odpowiadające realnym tolerancjom druku 3D (PLA) i wykonania warsztatowego elementów aluminiowych. Wyniki wskazują, że struktury w zakresie pasma Bragga wykazują dużą odporność na niewielkie tolerancje wykonania, natomiast struktury rezonatorowe są na nie znacznie bardziej wrażliwe.

**Słowa kluczowe:** kryształy dźwiękowe; tłumienie przenoszenia dźwięku; bariery akustyczne; rezonatory Helmholtza; hałas.

In recent decades, sonic crystals have become a key direction in passive noise control. They are structures with scattering elements arranged periodically in a transmission medium, usually air. In the classical approach, their effectiveness results from Bragg diffraction. Coherent wave scattering on a periodic lattice produces destructive interference within selected frequency ranges. This creates band gaps that limit sound propagation [1, 2]. The Bragg mechanism also has an important application limit. Effective attenuation below 1 kHz requires a larger geometric scale. This is often unacceptable because of size and cost. For this reason, sonic crystals with resonators, called LRSC, are gaining importance [1 ÷ 4]. This approach provides substantial attenuation for wavelengths much larger than the unit cell. It is useful for traffic and industrial noise. In practice, however, LRSC performance does not depend only on geometry. It also depends on whether that geometry can be manufactured with sufficient repeatability. Geometric tolerances and random manufacturing deviations therefore

W ostatnich dekadach kryształy dźwiękowe stały się jednym z kluczowych kierunków rozwoju pasywnej kontroli hałasu. Są to struktury, w których elementy rozpraszające rozmieszczone są periodycznie w ośrodku transmisyjnym, najczęściej w powietrzu. W ujęciu klasycznym ich skuteczność wynika z dyfrakcji Bragga. Spójne rozpraszanie fali na siatce periodycznej prowadzi do interferencji destruktywnej w określonych zakresach częstotliwości, co objawia się powstawianiem przerw pasmowych ograniczających propagację dźwięku [1, 2]. Jednocześnie mechanizm Bragga wiąże się z istotnym ograniczeniem aplikacyjnym. W celu efektywnego tłumienia częstotliwości poniżej 1 kHz, konieczne jest zwiększenie skali geometrycznej układu, co często jest nieakceptowalne z punktu widzenia gabarytów i kosztów. Z tego powodu zwiększa się znaczenie kryształów dźwiękowych z rezonatorami (LRSC) [1 ÷ 4]. Takie podejście umożliwia uzyskanie istotnego tłumienia fali o długości znacznie większej niż rozmiar komórki elementarnej, co jest szczególnie korzystne w zastosowaniu związanym z hałasem komunikacyjnym i przemysłowym. W praktyce jednak potencjał LRSC nie zależy wyłącznie od koncepcji geometrycznej, lecz w równym stopniu od tego, czy dana

<sup>1)</sup> Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy; jarad@ciop.pl

become critical. Despite rapid development of LRSC solutions, the literature still rarely treats manufacturing tolerances as a design parameter. This parameter affects acoustic performance under real conditions. This is an important knowledge gap. Resonance parameters respond nonlinearly to dimensional changes. The resonance frequency depends on the neck cross section, its effective length, and the chamber volume. Small deviations in these quantities may shift the attenuation maximum. They may also reduce matching to the target band [5]. In structures with many necks or complex topology, the problem becomes stronger. Simple analytical models lose uniqueness. The system response must then be described numerically. Such modelling must include coupling between elements and the real geometry [6]. Reports also show high sensitivity in resonators with a high quality factor. Even small dimensional deviations may detune and broaden the resonance effect. This directly reduces attenuation in a narrow band [7].

The importance of tolerances grows with the spread of additive technologies. Examples include stereolithography and selective laser melting of metals. These methods enable sonic crystal geometries that are difficult or impossible to obtain by conventional methods. On one hand, they provide broad design freedom. On the other, they introduce specific sources of uncertainty. These include surface roughness, local defects, edge inaccuracies, and diameter or opening deviations [8]. Such factors change effective dimensions, including the acoustic neck length. They also increase viscothermal losses and energy dissipation near walls. As a result, they modify the real attenuation characteristic. Against this background, a design approach that includes tolerances and randomness is especially important. This includes the geometry of single resonators and the arrangement of scatterers. Both should be treated as integral parts of design and validation. In practice, several effects must be analysed together. These include dimensional scatter, shifts and weakening of sound attenuation, and the resistance of periodic effects to structural disorder. Manufacturing technology, geometric tolerances, and losses must also be considered under real conditions. Viscothermal losses are part of this assessment.

Many studies focus on open configurations close to free field conditions. Engineering applications often involve duct systems. In such systems, transmission and coupling mechanisms may differ strongly from those observed in open space [11]. The literature has examined geometry and structural randomness in sonic crystals. Even so, manufacturing tolerances and geometric deviations remain described only to a limited extent.

They are still rarely treated as factors that determine attenuation effectiveness. For barriers based on sonic crystals, random changes in scatterer diameter and position can strongly affect attenuation values. They can also cause a visible spread of the acoustic response [12]. Studies of periodic structures with a defect also show strong sensitivity. Defect band frequencies and transmission characteristics depend on the width and position of elements that disturb

geometria może zostać wykonana z odpowiednią powtarzalnością. Kluczowe zatem staje się zagadnienie tolerancji geometrycznych i losowych odchyłek wykonania. Mimo intensywnego rozwoju rozwiązań LRSC, w literaturze wciąż relatywnie rzadko omawiane są tolerancje wykonania jako parametr projektowy, wpływający na skuteczność akustyczną w warunkach rzeczywistych. Jest to istotna luka wiedzy, ponieważ parametry rezonansowe są wrażliwe na zmiany wymiarów w sposób nieliniowy. Częstotliwość rezonansowa zależy m.in. od pola przekroju szyjki, jej efektywnej długości oraz objętości komory, a niewielkie odchyłki tych wielkości mogą przesunąć położenie maksimum tłumienia i pogarszać dopasowanie do docelowego pasma [5]. W strukturach z wieloma szyjkami lub złożoną topologią problem dodatkowo się nasila: proste modele analityczne przestają być jednoznaczne, a zachowanie układu trzeba opisywać numerycznie, uwzględniając sprzężenia między elementami oraz rzeczywistą geometrię [6]. Doniesienia wskazują również, że w rezonatorach o wysokiej „dobroci” nawet niewielkie odchyłki wymiarowe mogą prowadzić do rozstrojenia i „rozmycia” efektu rezonansowego, co bezpośrednio przekłada się na spadek tłumienia w wąskim paśmie [7].

Znaczenie tolerancji zwiększa się wraz z upowszechnieniem technologii addytywnych (np. stereolitografii czy selektywnego spiekania laserowego metali), które umożliwiają wytwarzanie geometrii kryształów dźwiękowych trudnych lub niemożliwych do uzyskania metodami klasycznymi. Z jednej strony daje to dużą swobodę projektową, ale z drugiej wprowadza specyficzne źródła niepewności, takie jak chropowatość powierzchni, lokalne defekty, niedokładności krawędzi i odchyłki średnicy otworów [8]. Czynniki te nie tylko zmieniają wymiary efektywne (np. długość akustyczną szyjki), lecz także zwiększają straty wiskotermiczne i dyssypację energii w pobliżu ścianek, co modyfikuje rzeczywistą charakterystykę tłumienia. Na tle dotychczasowych badań szczególnie ważne jest więc podejście, w którym tolerancje wykonania oraz losowość (zarówno w geometrii pojedynczych rezonatorów, jak i w rozmieszczeniu rozpraszaczy) traktuje się jako integralne elementy procesu projektowania i walidacji. W praktyce oznacza to potrzebę jednoczesnej analizy wpływu rozrzutu wymiarowego na przesunięcie i osłabienie tłumienia dźwięku, odporności efektów periodycznych na zaburzenia struktury oraz roli technologii wykonania, tolerancji geometrycznych i strat (w tym strat wiskotermicznych) w warunkach rzeczywistych.

Wiele prac koncentruje się na konfiguracjach otwartych, w warunkach zbliżonych do pola swobodnego, podczas gdy w zastosowaniach inżynierskich często występują układy kanałowe, gdzie mechanizmy transmisji i sprzężeń mogą istotnie różnić się od obserwowanych w otwartej przestrzeni [11]. W literaturze podejmowano próby oceny wpływu geometrii i losowości strukturalnej na właściwości akustyczne kryształów dźwiękowych, ale jednak zagadnienie tolerancji wykonawczych i odchyłek geometrycznych nadal pozostaje opisane w sposób ograniczony.

W przypadku barier z wykorzystaniem kryształów dźwiękowych wykazano, że losowe zmiany średnicy rozpraszaczy oraz ich położenia mogą istotnie wpływać na uzyskiwane wartości tłumienia i prowadzić do zauważalnego rozrzutu odpowiedzi akustycznej [12]. W badaniach struktur periodycznych z wpro-

ideal periodicity [9]. For Helmholtz resonators, the response is highly sensitive to aperture and neck geometry [7, 8]. It is also sensitive to small additional openings or leaks. Such defects may shift the resonance frequency and reduce attenuation effectiveness [10]. Recent studies also indicate that geometric defects in acoustic metamaterials may be treated as a design uncertainty parameter. This parameter requires a separate quantitative analysis [11]. At the same time, tolerance scales assumed in many studies raise serious doubts. In particular, some analysed geometric deviations reached several centimetres. For elements with dimensions of several tens of millimetres, this means changes of several percent of the nominal geometry [12]. Such large disturbances lack a clear link to real manufacturing technologies. In those technologies, typical inaccuracies of structural elements are usually at least one order of magnitude smaller. As a result, some available analyses describe extreme and technologically unlikely conditions. The real sensitivity of sonic crystals to practical manufacturing tolerances therefore remains unresolved. From the perspective of materials engineering, sonic crystals and locally resonant structures can be treated as functional material structures. Their service properties are determined not only by the base material. They are mainly determined by geometry, manufacturing method, and achievable accuracy. In this sense, their design belongs to materials engineering. It concerns shaping structures with defined functional properties while respecting technological limits. The relation between manufacturing technology, geometric scatter, and final acoustic response therefore becomes especially important. **Detailed finite element simulations in COMSOL are therefore justified.** The priority was to quantify how manufacturing tolerances, scatterer placement randomness, and manufacturing technology affect sound attenuation curves. Manufacturing technology was represented by achievable ranges of geometric deviations. A further aim was to identify the geometric parameters most critical for attenuation stability.

### Research Method

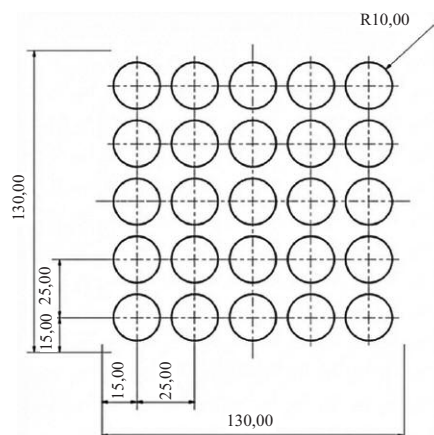
In the author's previous work, resonator geometry was assessed in relation to transmission loss characteristics [4]. Special attention was given to extending the effective attenuation range toward low frequencies. Those analyses identified configurations with the highest resonance efficiency. They also confirmed the usefulness of spatial 3D models for interference and resonance phenomena in finite duct structures. This article directly extends that work. It shifts the focus from ideal geometric configurations to manufacturing tolerances, structural randomness, and robustness to technological imperfections. These issues are essential for practical application. The same computational model assumptions were used. They included a 5 by 5 matrix of cylindrical scatterers, with a working volume of 130 x 130 x 140 mm. The matrix was placed in a rectangular duct measuring 130 x 140 x 450 mm (Figure 1).

wadzonym defektem pokazano ponadto, że częstotliwość pasm defektowych i charakterystyka transmisji są silnie zależne od zmian szerokości oraz położenia elementów zaburzających idealną periodyczność [9]. W odniesieniu do rezonatorów Helmholtza podkreśla się z kolei dużą wrażliwość odpowiedzi układu na geometrię apertury i szyjki [7, 8], a także na obecność nawet niewielkich dodatkowych otworów lub nieszczelności, które mogą prowadzić do istotnego przesunięcia częstotliwości rezonansowej i pogorszenia skuteczności tłumienia [10]. Nowe badania wskazują jednocześnie, że geometryczne defekty w metamateriałach akustycznych mogą być traktowane jako parametr niepewności projektowej, wymagający osobnej analizy ilościowej [11]. Ponadto przyjęte w wielu pracach założenia dotyczące skali tolerancji wykonania budzą dużo wątpliwości. Analizowane odchyłki geometryczne osiągały niekiedy wartości rzędu kilku centymetrów, co w przypadku elementów o charakterystycznych wymiarach kilkunastu lub kilkudziesięciu milimetrów oznacza zmiany sięgające kilkunastu procent geometrii nominalnej [12]. Tak duże zaburzenia pozostają bez wyraźnego odniesienia do rzeczywistych technologii wytwarzania, w których typowe niedokładności wykonania elementów konstrukcyjnych są zwykle co najmniej o rząd wielkości mniejsze. W konsekwencji część dostępnych analiz opisuje zachowanie struktur w warunkach skrajnych i mało prawdopodobnych technologicznie, pozostawiając otwartą kwestię rzeczywistej wrażliwości kryształów dźwiękowych na tolerancje wykonania występujące w praktycznym zastosowaniu.

Z punktu widzenia inżynierii materiałowej, kryształy dźwiękowe oraz struktury lokalnie rezonujące można traktować jako funkcjonalne struktury materiałowe, których właściwości użytkowe są determinowane nie tylko przez materiał bazowy, lecz przede wszystkim przez geometrię, sposób oraz dokładność wykonania. W tym sensie projektowanie takich układów wpisuje się w obszar inżynierii materiałowej, rozumianej jako kształtowanie struktur o zadanych właściwościach funkcjonalnych z uwzględnieniem ograniczeń technologicznych. Szczególne znaczenie nabiera zatem analiza zależności pomiędzy technologią wykonania, rozrzutem geometrycznym i końcową odpowiedzią akustyczną układu. **Konieczne jest więc przeprowadzenie szczegółowych analiz symulacyjnych metodą elementów skończonych w środowisku COMSOL.** Priorytetem było ilościowe określenie, w jakim stopniu tolerancje wykonania, losowość rozmieszczenia rozpraszaczy oraz technologie wykonania, określane przez osiągany zakres odchyłek geometrycznych, wpływają na przebieg charakterystyki tłumienia dźwięku, a także identyfikację parametrów geometrycznych najbardziej krytycznych w przypadku stabilności efektu tłumienia.

### Metoda badań

W pracy [4] oceniono wpływ geometrii rezonatorów na charakterystyki tłumienia przenoszenia, ze szczególnym uwzględnieniem rozszerzenia skutecznego zakresu tłumienia w kierunku niskiej częstotliwości. Przeprowadzone analizy umożliwiły identyfikację konfiguracji o największej efektywności rezonansowej oraz potwierdziły zasadność stosowania modeli przestrzennych 3D do opisu zjawisk interferencyjnych



**Fig. 1. Geometry of the computational model**

*Rys. 1. Geometria modelu obliczeniowego*

Each scatterer had an external diameter of 20 mm and a height of 140 mm. The elements were designed as hollow cylinders. This allowed modifications such as openings or slots that form a Helmholtz resonator system. For uniform spacing in the 5 by 5 configuration, the lattice constant was set to  $a = 25$  mm. On this basis, a band gap related to the Bragg mechanism was expected at about 5 to 8 kHz.

Based on previous results [4], the baseline variant was a classical resonator with one circular opening of nominal diameter 3 mm. This variant showed a clear resonance effect while maintaining attenuation in the Bragg band. The present work deliberately reduced the number of configurations to two key models. This allowed the analysis to focus on robustness to manufacturing and assembly imperfections. It also provided a reliable basis for experimental validation:

- **SC** (reference variant) – a system of solid cylinders without openings. It was used to analyse attenuation caused by periodic wave scattering. It also served to assess how disturbed periodicity affects broadband characteristics;
- **LRSC** (resonant variant) – a system of 25 cylinders with one opening in the side wall. The opening had a diameter of 3 mm. It was nominally located at half the scatterer height.

Both variants retained the 5 by 5 arrangement and equal spacing between scatterers. The outer scatterers were also placed symmetrically relative to the duct walls. This reduced boundary effects and ensured direct comparability between configurations. Acoustic wave propagation was analysed in the frequency domain. Excitation was defined as a plane wave travelling along the duct axis, denoted as the Z axis. This followed the idea of laboratory conditions with a nearly uniform inlet field.

Air was used as the acoustic propagation medium in the numerical model. The duct walls and scatterer surfaces were modelled with a sound hard boundary condition. This assumes acoustically rigid and perfectly reflecting boundaries. It neglects structural vibrations and losses directly related to wall material properties. Thus, the analysed model did not distinguish FDM 3D printed PLA elements and aluminum elements made from semi finished stock through separate material parameters. Density, elastic modulus, and internal damping were not varied. The distinction between

i rezonansowych w skończonych strukturach kanałowych. W tym artykule zaprezentowano bezpośrednie rozwinięcie badań, przenosząc punkt ciężkości z analizy idealnych konfiguracji geometrycznych na ocenę wpływu tolerancji wykonania, losowości strukturalnej oraz odporności zaprojektowanych rozwiązań na nieidealność technologii, co ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia ich praktycznego wykorzystania. Zastosowano te same założenia modelu obliczeniowego, obejmujące macierz  $5 \times 5$  cylindrycznych rozpraszaczy (obszar roboczy  $130 \times 130 \times 140$  mm), umieszczoną w prostokątnym kanale o wymiarach  $130 \times 140 \times 450$  mm (rysunek 1).

Każdy rozpraszacz miał średnicę zewnętrzną 20 mm i wysokość 140 mm. Elementy zaprojektowano jako puste w środku, dzięki czemu możliwe było wprowadzanie modyfikacji w postaci otworów lub szczelin tworzących układ charakterystyczny w przypadku rezonatorów Helmholtza. W celu równomiernego rozstawu w konfiguracji  $5 \times 5$  przyjęto stałą sieci krystalicznej  $a = 25$  mm. Na tej podstawie przewidywano występowanie przerwy pasmowej związanej z mechanizmem Bragga w paśmie ok. 5 – 8 kHz.

Uwzględniając wyniki poprzedniej mojej pracy [4], jako wariant bazowy przyjęto klasyczny rezonator z pojedynczym otworem okrągłym o średnicy nominalnej 3 mm, charakteryzujący się wyraźnym efektem rezonansowym z zachowaniem tłumienia w paśmie Bragga. Celowo zawężono liczbę rozpatrywanych konfiguracji do dwóch kluczowych modeli, aby skoncentrować się na ocenie odporności geometrii na nieidealność wykonania i montażu oraz uzyskać wiarygodną bazę porównawczą w przypadku walidacji eksperymentalnej:

- **SC** (wariant referencyjny) – układ pełnych cylindrów bez otworów, służący do analizy tłumienia wynikającego z periodycznego rozpraszania fali oraz do oceny wpływu zaburzenia periodyczności na charakterystyki szerokopasmowe;
- **LRSC** (wariant rezonujący) – układ 25 cylindrów z pojedynczym otworem w ścianie bocznej ( $\varnothing 3$  mm), umieszczonym nominalnie w połowie wysokości rozpraszacza.

W obu wariantach utrzymano układ  $5 \times 5$  i jednakowe odstępy pomiędzy rozpraszaczami, a także symetryczne odsunięcie skrajnych rozpraszaczy od ścian kanału. Zabieg ten ograniczał wpływ efektów brzegowych i zapewniał bezpośrednią porównywalność wyników pomiędzy konfiguracjami. Analizę propagacji fali akustycznej przeprowadzono w dziedzinie częstotliwości. Pobudzenie zadano w postaci fali płaskiej propagującej wzdłuż osi kanału (oś Z), zgodnie z ideą warunków laboratoryjnych, w których dąży się do możliwie jednorodnego pola na wlocie kanału.

W modelu numerycznym przyjęto powietrze jako ośrodek propagacji fali akustycznej. Ściany kanału oraz powierzchnie rozpraszaczy modelowano z zastosowaniem warunku brzegowego typu „sound hard boundary”, co oznacza założenie akustycznie sztywnych, idealnie odbijających granic bez uwzględnienia drgań strukturalnych elementów oraz strat związanych bezpośrednio z właściwościami materiałowymi ścian. W analizowanym modelu nie różnicowano więc wariantów druku 3D metodą FDM (PLA) oraz elementów aluminiowych wykonywanych z półfabrykatu (ALU) przez przypisanie im odrębnych

variants resulted only from different ranges of geometric deviations. These ranges represented two manufacturing technologies planned for experimental validation. Consequently, the comparison of PLA and ALU variants should not be read as a direct assessment of material effects. It should be read as an assessment of realistic manufacturing imperfections linked to different production methods. The finite element mesh was selected to represent the acoustic field correctly across the analysed band. The discretisation density was related to the wavelength at the highest analysed frequency, 10 kHz. A minimum number of elements per wavelength was assumed in the air volume. Local mesh refinement was also introduced in regions with expected high field gradients. These regions included openings, slots, and constrictions in resonant variants. This reduced approximation error and captured local pressure and particle velocity extrema. These extrema determine the resonant character of attenuation.

Calculations were performed from 100 to 10000 Hz. Two frequency resolutions were used. They followed from different physical mechanisms and from the computational cost of numerical analyses.

■ **LRSC** – a 10 Hz step was used. This allowed accurate tracking of the resonance frequency, maximum TL, and resonance band width. These quantities may change because of small geometric deviations and detuning of elements in the structure.

■ **SC** – a 50 Hz step was used. It was considered sufficient for identifying band gaps and broadband TL changes related to Bragg scattering and interference. It also limited computation time. This was important in full 3D models, where shorter wavelengths require denser meshes and rapidly increase the number of degrees of freedom.

The sensitivity of acoustic properties to geometry changes was assessed by introducing individual dimensional deviations. They were assigned independently to each of the 25 scatterers. This reflects real conditions. In practice, dimensional scatter and assembly errors are not identical for all elements. Their combined effect determines the system response.

Two nominal models served as reference cases. They were SC without openings and LRSC with a 3.0 mm opening located at half the cylinder height. Variants with deviations were then defined. They included the deterministic PG case and two random realisations, R1 and R2. In each variant, every scatterer had its own set of deviations (Figure 2).

For the  $i$ th element, the deviation vector included:

- position shifts in the duct cross section plane:  $\Delta x_i, \Delta y_i$ ;
- external diameter deviation:  $\Delta D_i$ ;
- wall thickness deviation:  $\Delta t_i$ ;
- for LRSC, opening diameter deviation:  $\Delta d_{h,i}$ ;
- for LRSC, deviation of opening height position:  $\Delta z_{h,i}$ ;
- and, for the aluminum variant with a workshop drilled opening, transverse shift of the opening axis:  $\Delta s_{h,i}$ .

Tolerance ranges were adopted separately for two manufacturing technologies planned for experimental validation. They were FDM 3D printing in PLA and aluminum elements made from semi finished stock. In the aluminum variant, the

parametrów materiałowych, takich jak gęstość, moduł sprężystości czy tłumienie wewnętrzne. Rozróżnienie tych wariantów wynikało wyłącznie z przyjęcia różnych zakresów odchyłek geometrycznych, odpowiadających dwóm technologiom wykonania, przewidzianym do walidacji eksperymentalnej. W konsekwencji porównanie wariantów PLA i ALU należy interpretować nie jako bezpośrednią ocenę wpływu materiału konstrukcyjnego na odpowiedź akustyczną układu, lecz jako ocenę wpływu realistycznych niedoskonałości wykonawczych, związanych z odmienną technologią wytwarzania elementów. Siatkę elementów skończonych dobrano tak, aby zapewnić poprawną reprezentację pola akustycznego w całym rozpatrywanym paśmie. Kryterium doboru gęstości dyskretyzacji odniesiono do długości fali w największej analizowanej częstotliwości (10 kHz), zakładając minimalną liczbę elementów na długość fali w objętości powietrza. Dodatkowo wprowadzono lokalne zagęszczenie siatki w obszarach spodziewanych dużych gradientów pola, tj. w rejonie otworów, szczelin i przewężeń (warianty rezonujące), aby ograniczyć błąd aproksymacji i prawidłowo odwzorować lokalne ekstrema ciśnienia oraz prędkości cząstek, decydujące o charakterze rezonansowym tłumienia.

Obliczenia wykonano w zakresie 100 – 10000 Hz, stosując dwie różne rozdzielczości częstotliwościowe, wynikające z odmiennych mechanizmów fizycznych oraz czasochłonności obliczeń numerycznych:

■ **LRSC** – zastosowano krok 10 Hz, aby precyzyjnie śledzić położenie częstotliwości rezonansowej, poziom maksimum TL oraz zmiany szerokości pasma rezonansowego, które mogą wynikać z niewielkich odchyłek geometrii i rozstrojenia elementów w strukturze;

■ **SC** – zastosowano krok 50 Hz, uznając go za wystarczający do identyfikacji przerw pasmowych i szerokopasmowych zmian TL związanych z rozpraszaniem i interferencją Bragga, przy jednoczesnym ograniczeniu czasu obliczeń (istotnego w pełnych modelach 3D, gdzie skracanie długości fali wymusza silniejsze zagęszczenie siatki i gwałtowne zwiększenie liczby stopni swobody).

Wrażliwość właściwości akustycznych struktur na zmiany geometrii oceniano przez wprowadzenie indywidualnych odchyłek wymiarowych, przypisywanych niezależnie każdemu z 25 rozpraszaczy. Takie podejście odzwierciedla warunki rzeczywiste, w których rozrzut wymiarów i błędy montażowe nie są identyczne w przypadku wszystkich elementów, a ich suma determinuje odpowiedź układu. Punktem odniesienia były dwa modele nominalne, tj. SC bez otworów oraz LRSC z otworem  $\varnothing$  3,0 mm, zlokalizowanym w połowie wysokości cylindra. Na ich podstawie zdefiniowano warianty z odchyłkami, tj. deterministyczny PG (przypadek graniczny) oraz dwie realizacje losowe R1 i R2, przy czym w każdym z wariantów każdy rozpraszacz miał własny zestaw odchyłek (rysunek 2).

W przypadku  $i$ -tego elementu wprowadzono wektor odchyłek obejmujący:

- przesunięcie położenia w płaszczyźnie przekroju kanału –  $\Delta x_i, \Delta y_i$ ;
- odchyłkę średnicy zewnętrznej –  $\Delta D_i$ ;
- odchyłkę grubości ścianki –  $\Delta t_i$ ;

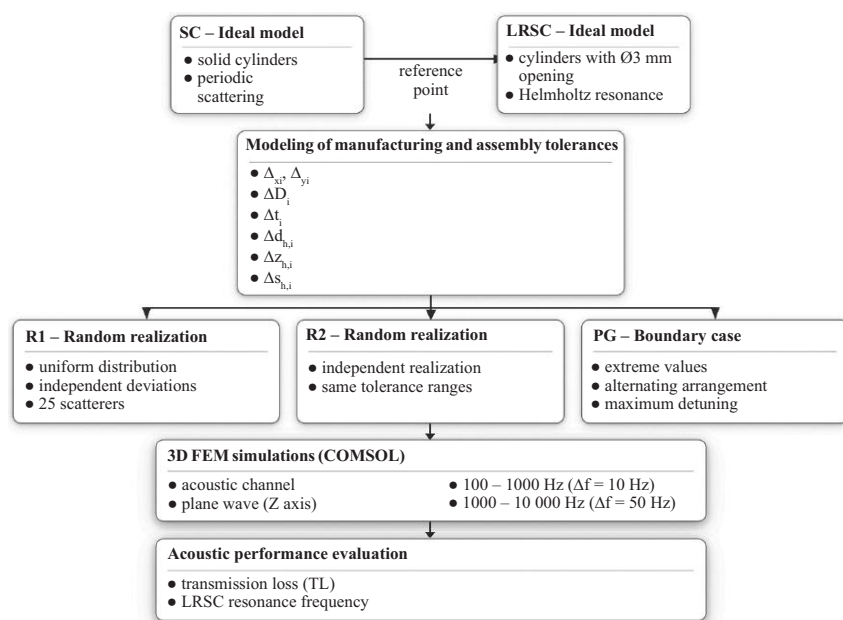


Fig. 2. Flowchart of the investigation of the effect of manufacturing and assembly tolerances on sound attenuation effectiveness in computational models

Rys. 2. Schemat postępowania w badaniach wpływu tolerancji wykonania i montażu na skuteczność tłumienia dźwięku w modelach obliczeniowych

opening was made by drilling (Tables 1 and 2) [8]. For PLA 3D printing, typical dimensional scatter was included. Greater sensitivity to small opening quality and Z axis resolution was also considered. For aluminum, smaller deviations were assumed for the semi finished stock itself. Additional uncertainties related to drilling were also included. These included clamping, drill guidance, and burr formation. In practice, they are often the dominant source of geometric error.

It should be emphasised that the PLA and ALU variants represent two different manufacturing technologies. They also represent the related ranges of geometric tolerances. The comparison is therefore not a direct comparison of material property effects on the acoustic response. Instead, it assesses the sensitivity of the designed geometry to realistic manufacturing imperfections.

In random realisations R1 and R2, deviation values were generated independently for each scatterer. A uniform distribution was used within the defined intervals. The

d) w przypadku LRSC odchyłkę średnicy otworu –  $\Delta d_{h,i}$ ;

e) w przypadku LRSC odchyłkę wysokości położenia otworu –  $\Delta Z_{n,i}$ ;

f) oraz (w przypadku wariantu aluminiowego z otworem wykonywanym warsztatowo) poprzeczne przesunięcie osi otworu –  $\Delta S_{h,i}$ .

Zakres tolerancji przyjęto inny w przypadku dwóch technologii wykonania przewidzianych do walidacji eksperymentalnej, tj. druku 3D metodą FDM (PLA) oraz elementów aluminiowych wykonywanych z półfabrykatu (ALU) z otworem realizowanym metodą wiercenia (tabela 1 i 2) [8]. W przypadku druku 3D (PLA) uwzględniono typowe rozrzuty wymiarowe oraz dużą wrażliwość na jakość małych otworów i rozdzielczość w osi Z, natomiast w przypadku aluminium przyjęto mniejsze odchyłki związane z samym półfabrykatem, lecz dodatkowo uwzględniono niepewność operacji wiercenia (m.in. ustawienie w uchwycie, prowadzenie wiertła, powstawanie gratu), która

w praktyce stanowi częste źródło dominującego błędu geometrycznego. Należy podkreślić, że warianty PLA i ALU pełnią rolę reprezentacji dwóch odmiennych technologii wykonania i związanych z nimi zakresów tolerancji geometrycznych. Porównanie to nie ma więc charakteru bezpośredniego porównania wpływu właściwości materiałowych tych materiałów na odpowiedź akustyczną, lecz służy ocenie wrażliwości zaprojektowanej geometrii na realistyczne niedoskonałości wykonawcze.

W realizacjach losowych R1 i R2 wartości odchyłek generowano niezależnie w przypadku każdego rozpraszacza z rozkładu jednostajnego w zdefiniowanych przedziałach, traktując tolerancje jako zakres dopuszczalny. Rozwiązanie to pozwoliło uzyskać reprezentatywne przypadki bez prowadzenia pełnych analiz Monte Carlo. Uzupełnieniem był przypadek graniczny PG, w którym zastosowano wartości skrajne odchyłek, rozmieszczone naprzemiennie w układzie 5×5 w celu maksymalizacji rozstrojenia re-

Table 1. Tolerance ranges – 3D printing (FDM)

Tabela 1. Zakres tolerancji – druk 3D (FDM)

Parameter/Parametr	Deviation range [mm]/Zakres odchyłek [mm]	Description/Opis
$\Delta x_i, \Delta y_i$	±0,50	positioning and assembly of elements/ pozycjonowanie i montaż elementów
$\Delta D_i$	±0,20	print resolution, material shrinkage/ rozdzielczość druku, skurcz materiału
$\Delta t_i$	±0,20	wall nonuniformity/niejednorodność ścianek
$\Delta d_{h,i}$	±0,15	quality of small openings in FDM printing/ jakość małych otworów w druku FDM
$\Delta Z_{n,i}$	±0,50	Z axis resolution, layer effect/ rozdzielczość osi Z, efekt warstwowy

Table 2. Tolerance ranges – aluminum (tube + workshop drilling)

Tabela 2. Zakresy tolerancji – aluminium (rura + wiercenie warsztatowe)

Parameter/Parametr	Deviation range [mm]/Zakres odchyłek [mm]	Description/Opis
$\Delta x_i, \Delta y_i$	±0,30	assembly tolerances in the structure/tolerancje montażu w strukturze
$\Delta D_i$	±0,10	dimensional accuracy of the tube/dokładność wymiarowa rury
$\Delta t_i$	±0,10	wall thickness tolerances/tolerancje grubości ścianki
$\Delta d_{h,i}$	±0,10	drilling without reaming/wiercenie bez rozwiertaka
$\Delta Z_{n,i}$	±0,20	axial positioning of the opening/pozycjonowanie osiowe otworu
$\Delta S_{h,i}$	±0,20	positioning error in the vice or fixture/błąd ustawienia w imadle/uchwycie

tolerances were treated as admissible ranges. This approach produced representative cases without full Monte Carlo analyses. The PG boundary case complemented them. It used extreme deviation values arranged alternately in the 5 by 5 system. The aim was to maximise resonance detuning in LRSC and periodicity disturbance in SC. The PG case was interpreted as the least favourable scenario. It defined the lower expected limit of attenuation effectiveness.

## Results

Figure 3 compares TL characteristics from 1 to 10 kHz. It covers the ideal SC reference structure and variants with geometric deviations. The deviations correspond to the PG case for aluminum fabrication and PLA 3D printing. Across the analysed frequency range, the TL curves agree very well. Minima and maxima occur at similar frequencies. This confirms that periodic acoustic wave scattering dominates attenuation in this band. The introduced geometric tolerances do not substantially change the response character of the structure. The agreement across a broad frequency band confirms that their influence is secondary in this case. They do not cause significant degradation of transmission loss where Bragg effects dominate. However, Figure 4 shows disturbed symmetry in the sound pressure level distribution at the Bragg frequency. Geometry changes weaken the interference effect. Local field disturbances also appear.

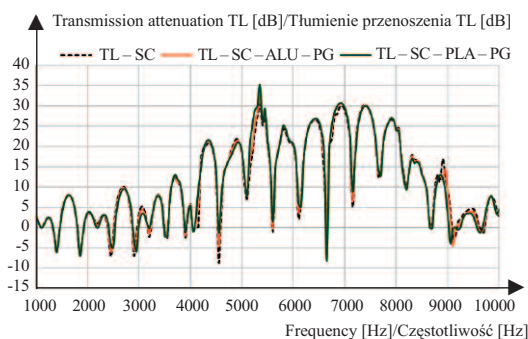
Figures 5 and 6 compare TL characteristics near the band with the highest sound attenuation. They include the ideal SC reference structure and three variants with manufacturing and assembly deviations, PG, R1, and R2. In the analysed frequency range, periodic scattering and multiple interference in a finite structure dominate. All tolerance realisations show locally higher TL values than the ideal model. This results from small geometry disturbances in the scatterers. They weaken coherent propagation in the ordered structure.

zonansów (LRSC) i maksymalnego naruszenia periodyczności (SC). Przypadek graniczny PG interpretowano jako scenariusz najmniej korzystny, wyznaczający dolną granicę spodziewanej skuteczności tłumienia.

## Wyniki

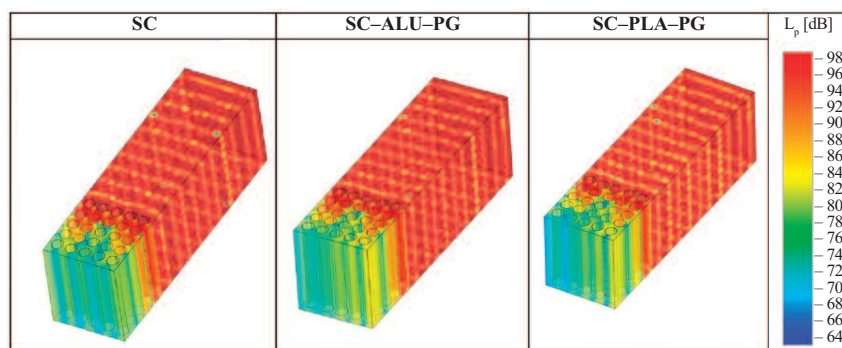
Na rysunku 3 przedstawiono porównanie charakterystyk tłumienia przenoszenia TL w paśmie 1 – 10 kHz w przypadku struktury referencyjnej SC o geometrii idealnej oraz wariantów z wprowadzonymi odchyłkami geometrycznymi odpowiadającymi przypadkowi granicznemu (PG) w zakresie tolerancji przypisanych wykonaniu elementów aluminiowych (SC-ALU-PG) oraz technologii druku 3D z PLA (SC-PLA-PG). W całym analizowanym zakresie częstotliwości przebiegi TL wykazują bardzo dobrą zgodność pod względem położenia minimów i maksimów. Potwierdza to, że dominującym mechanizmem tłumienia w tym paśmie jest periodyczne rozpraszanie fali akustycznej, a wprowadzone tolerancje geometryczne nie powodują zasadniczej zmiany charakteru odpowiedzi struktury. Zbieżność przebiegów w szerokim paśmie częstotliwości potwierdza, że wpływ tolerancji wykonania ma w tym przypadku charakter drugorzędny i nie prowadzi do istotnej degradacji skuteczności tłumienia przenoszenia w zakresie dominacji efektów Bragga. Na rysunku 4 można jednak zaobserwować zaburzoną symetrię rozkładu poziomów ciśnienia akustycznego w przypadku częstotliwości Bragga. Zmiany w geometrii prowadzą do osłabienia efektu interferencyjnego i do pojawienia się lokalnych zaburzeń pola.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono porównanie charakterystyk i tłumienia przenoszenia TL w okolicy pasma największego tłumienia dźwięku w przypadku struktury referencyjnej SC o geometrii idealnej oraz trzech wariantów z wprowadzonymi odchyłkami geometrycznymi, odpowiadającymi tolerancjom wykonania i montażu (PG, R1, R2). W analizowanym zakresie częstotliwości, w którym dominują zjawiska periodycznego rozpraszania (mechanizm typu Bragga) oraz interferencja



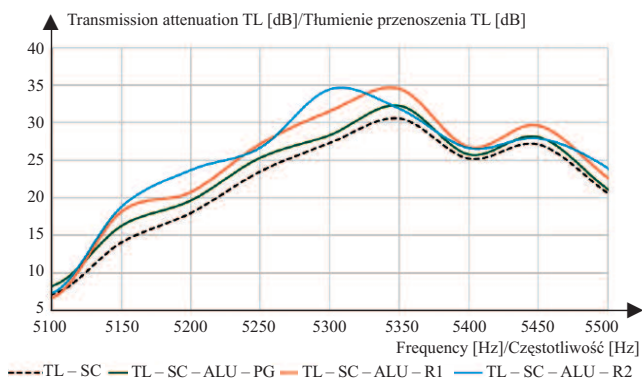
**Fig. 3. Transmission attenuation of the computational models – reference SC structure and variants with geometric deviations corresponding to the worst-case PG scenario for tolerance ranges associated with aluminum fabrication and FDM 3D printing from PLA**

Rys. 3. Tłumienie przenoszenia modeli obliczeniowych – struktury referencyjnej SC oraz wariantów z odchyłkami geometrycznymi odpowiadającymi przypadkowi granicznemu PG w zakresie tolerancji związanych z wykonaniem elementów aluminiowych i drukiem 3D z PLA



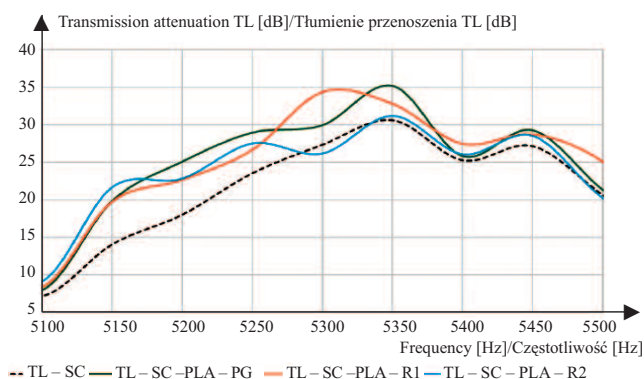
**Fig. 4. Sound pressure level  $L_p$  distribution at the Bragg frequency (5350 Hz) – reference SC structure and variants with geometric deviations corresponding to the worst-case PG scenario for tolerance ranges associated with aluminum fabrication and FDM 3D printing from PLA**

Rys. 4. Rozkład poziomu ciśnienia akustycznego  $L_p$  w przypadku częstotliwości Bragga (5350 Hz) – struktura referencyjna SC oraz warianty z wprowadzonymi odchyłkami geometrycznymi odpowiadającymi przypadkowi granicznemu PG dla zakresów tolerancji związanych z wykonaniem elementów aluminiowych i drukiem 3D z PLA



**Fig. 5. Transmission attenuation of the SC computational models (tolerance ranges for aluminum)**

*Rys. 5. Tłumienie przenoszenia modeli obliczeniowych SC (zakresy tolerancji w przypadku aluminium)*



**Fig. 6. Transmission attenuation of the SC computational models (tolerance ranges for PLA)**

*Rys. 6. Tłumienie przenoszenia modeli obliczeniowych SC (zakresy tolerancji w przypadku PLA)*

Geometric changes scatter the phase and amplitude of the wave on successive elements. They also reduce wave propagation stability and strengthen multiple scattering.

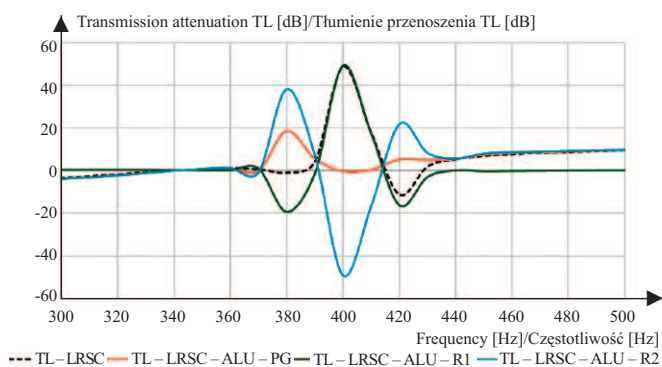
Figure 7 presents TL characteristics for the ideal LRSC structure and variants with geometric tolerances. These variants are ALU-PG, ALU-R1, and ALU-R2. Introducing geometric deviations clearly lowers the maximum TL values. It also shifts the maximum attenuation near the resonance frequency. This results from detuning of the resonances of individual elements. Differences between random realisations confirm the high sensitivity of locally resonant structures to geometric inaccuracies. They cause substantial changes in attenuation effectiveness within a narrow frequency band.

Figure 8 presents TL characteristics for the LRSC structure with tolerance ranges for PLA 3D printing. It includes the ideal reference simulation, TL-LRSC, and three variants with geometric deviations, PLA-PG, PLA-R1, and PLA-R2. For the ideal model, a narrowband attenuation maximum appears near 400 Hz. It reaches about 50 dB. Introducing geometric tolerances substantially lowers the maximum TL values. It also disperses and shifts the resonance frequency. Individual random realisations show different curve shapes. A lower amplitude and a wider effective attenuation band are

wielokrotna w strukturze skończonej, wszystkie realizacje z tolerancjami wykazują lokalnie większe wartości TL w porównaniu z modelem idealnym. Wynika to z faktu, że nawet niewielkie zaburzenia geometrii rozpraszaczy prowadzą do osłabienia koherentnej propagacji w strukturze uporządkowanej. Wprowadzenie zmian geometrycznych rozprasza fazę i amplitudę fali na kolejnych elementach, ogranicza stabilność propagacji fali oraz wzmacnia rozpraszanie wielokrotne.

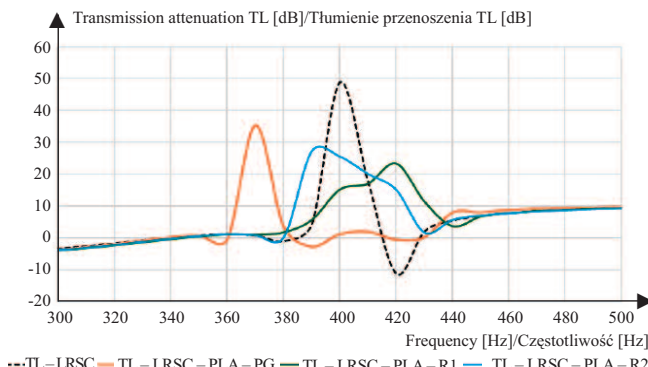
Na rysunku 7 przedstawiono charakterystykę tłumienia przenoszenia TL struktury lokalnie rezonującej LRSC o geometrii idealnej oraz w przypadku wariantów z wprowadzonymi tolerancjami geometrycznymi (ALU-PG, ALU-R1, ALU-R2). Wprowadzenie odchyłek geometrycznych powoduje wyraźne zmniejszenie maksymalnych wartości TL oraz przesunięcie maksymalnego tłumienia w pobliżu częstotliwości rezonansowej, co jest wynikiem rozstrojenia rezonansów poszczególnych elementów. Różnice pomiędzy realizacjami losowymi potwierdzają dużą wrażliwość kryształów dźwiękowych lokalnie rezonujących na niedokładności geometryczne, skutkującą istotnymi zmianami skuteczności tłumienia w wąskim paśmie częstotliwości.

Na rysunku 8 przedstawiono charakterystyki tłumienia przenoszenia TL w przypadku struktury LRSC w wariacie odpowiadającym zakresom tolerancji technologii druku 3D



**Fig. 7. Transmission attenuation of the LRSC computational models (tolerance ranges for aluminum)**

*Rys. 7. Tłumienie przenoszenia modeli obliczeniowych LRSC (zakresy tolerancji w przypadku aluminium)*

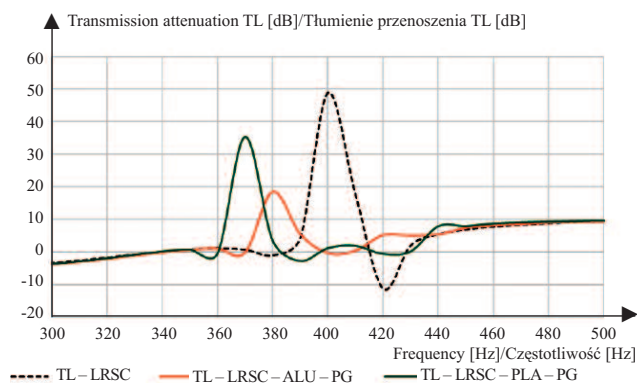


**Fig. 8. Transmission attenuation of the LRSC computational models (tolerance ranges for PLA)**

*Rys. 8. Tłumienie przenoszenia modeli obliczeniowych LRSC (zakresy tolerancji w przypadku PLA)*

observed. These results confirm the high sensitivity of locally resonant structures to geometric inaccuracies. They also show that real attenuation effectiveness in the narrow resonance band depends strongly on parameter scatter in individual resonators.

Figure 9 presents TL characteristics from 300 to 500 Hz for the LRSC structure. It includes the TL-LRSC reference simulation for ideal geometry, without tolerance deviations or additional losses. It also includes PG simulations for aluminum fabrication and PLA 3D printing. In all cases, a clear resonance response appears near 400 Hz. However, the curves differ substantially in amplitude and attenuation band width. The PG variants show clear local resonator excitation at 400 Hz (Figure 10). This does not produce a similar decrease in sound pressure behind the structure. The introduced geometric deviations detune the natural frequencies of individual elements. They also disrupt the coherent resonance mechanism responsible for transmission reduction in the ideal model. As a result, energy is concentrated locally in the resonators. However, the effective impedance mismatch of the whole barrier is weakened at this frequency. The attenuation maximum shifts in the spectrum and its amplitude decreases.

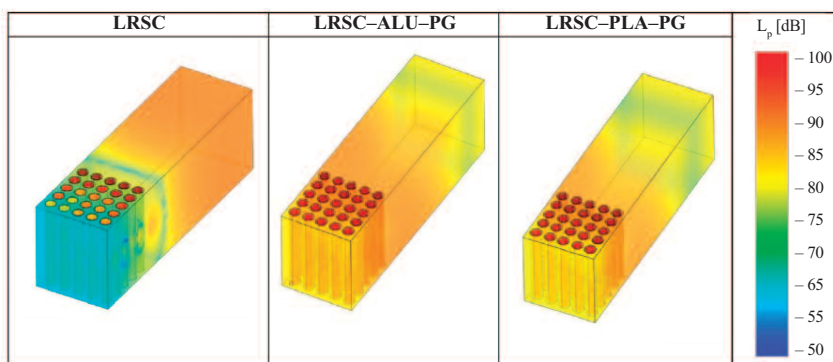


**Fig. 9. Transmission attenuation of the LRSC computational models – worst-case tolerance scenarios for aluminum and PLA**  
 Rys. 9. Tłumienie przenoszenia modeli obliczeniowych LRSC – przypadki graniczne zakresów tolerancji w przypadku aluminium i PLA

z PLA, obejmujące symulację referencyjną o idealnej geometrii (TL-LRSC) oraz trzy warianty z wprowadzonymi odchyłkami geometrycznymi (PLA-PG, PLA-R1, PLA-R2). W przypadku modelu idealnego obserwuje się wąskopasmowe maksimum tłumienia w okolicy 400 Hz, osiągające ok. 50 dB. Wprowadzenie tolerancji geometrycznych powoduje istotne obniżenie wartości maksymalnych TL oraz rozproszenie i przesunięcie częstotliwości rezonansowej. Poszczególne realizacje losowe wykazują zróżnicowany przebieg charakterystyk, przy czym obserwuje się obniżenie amplitudy i poszerzenie efektywnego pasma tłumienia. Wyniki te potwierdzają dużą wrażliwość struktur lokalnie rezonujących na niedokładności geometryczne oraz wskazują, że rzeczywista skuteczność tłumienia w wąskim paśmie rezonansowym jest silnie uzależniona od rozrzutu parametrów poszczególnych rezonatorów.

Na rysunku 9 przedstawiono charakterystyki TL w zakresie 300 – 500 Hz w przypadku struktury LRSC, obejmujące symulację referencyjną TL-LRSC, wykonaną przy idealnej geometrii bez uwzględnienia odchyłek tolerancji i strat dodatkowych oraz wyniki symulacji przypadków granicznych w zakresie tolerancji odpowiadających wykonaniu elementów aluminiowych (ALU-PG) oraz technologii druku 3D z PLA (PLA-PG). We wszystkich przypadkach obserwuje się wyraźną odpowiedź rezonansową zlokalizowaną w pobliżu 400 Hz, ale przebiegi istotnie różnią się pod względem amplitudy oraz szerokości pasma tłumienia. W wariantach PG obserwuje się wyraźne lokalne pobudzenie rezonatorów przy 400 Hz (rysunek 10), ale nie przekłada się to na analogiczne zmniejszenie ciśnienia akustycznego za strukturą, ponieważ wprowadzone odchyłki geometryczne rozstrajają częstotliwość własną poszczególnych elementów i niszczą koherentny mechanizm rezonansowy odpowiedzialny za redukcję transmisji w modelu idealnym. W konsekwencji energia ulega lokalnej koncentracji w rezonatorach, jednak efektywne niedopasowanie impedancyjne całej bariery w tej częstotliwości jest osłabione, a maksimum tłumienia ulega przesunięciu w widmie i obniżeniu amplitudy.

Przypadki graniczne ALU-PG i PLA-PG wykazują wyraźne osłabienie idealnej odpowiedzi rezonansowej obserwowanej w przypadku struktury referencyjnej. W wariantach PLA-PG maksimum tłumienia TL jest przesunięte ku mniejszej częstotliwości



**Fig. 10. Sound pressure level  $L_p$  distribution at the resonant frequency of scatterers (400 Hz) – reference LRSC structure and variants with geometric deviations corresponding to the worst-case scenario PG (aluminum and PLA)**

Rys. 10. Rozkład poziomego ciśnienia akustycznego  $L_p$  w przypadku częstotliwości rezonansowej rozpraszaczy (400 Hz) – struktury referencyjnej LRSC oraz wariantów z wprowadzonymi odchyłkami geometrycznymi odpowiadającymi przypadkowi granicznemu PG (aluminium i PLA)

The ALU-PG and PLA-PG cases show a clear weakening of the ideal resonance response. In the PLA-PG variant, the TL maximum shifts toward lower frequencies, about 360 to 370 Hz. It reaches values of about 35 dB. The curve is also strongly flattened near the resonance frequency of the ideal structure. For ALU-PG resonators, the maximum TL is much lower, reaching about 18 dB. It is located at about 375 to 385 Hz. Compared with PLA-PG, the ALU-PG response has a narrower interaction band and a smaller amplitude. Its characteristic is also smoother. In both cases, geometric tolerances reduce TL. They also shift the frequency of maximum attenuation relative to the reference simulation.

### Conclusions and Summary

The analyses show that, in the considered acoustic model, the insulating effectiveness of sonic crystal barriers is mainly determined by geometry. It is also determined by the sensitivity of that geometry to manufacturing deviations. Thus, higher transmission loss can be achieved mainly by deliberate shaping of scatterer and resonator geometry. Technological limits must already be included at the design stage. In this work, differences between PLA and ALU variants should be interpreted mainly as effects of different tolerance ranges. They follow from the selected manufacturing technology. They should not be read as direct effects of the material properties of the structural materials.

Unlike classical SC structures, locally resonant sonic crystals are highly susceptible to geometric deviations. Even relatively small manufacturing tolerances detune the resonances of individual cells. This lowers the effective insulation of the whole barrier. The result indicates a need for design procedures that include tolerances during geometry optimisation. The presence of local resonance in individual LRSC elements does not guarantee improved global acoustic insulation. Effective sound attenuation requires resonance coherence between cells. This coherence was clearly disturbed in the PG cases and in the random tolerance realisations. This conclusion is directly relevant to systems where assembly nonuniformities are difficult to eliminate fully.

The results confirm that numerical simulations are useful for qualitative assessment of manufacturing tolerances and structural randomness. They help evaluate their effect on transmission loss in sonic crystal barriers. It should be emphasised that the assessment used a limited set of geometric realisations. It included two random cases and one PG case. This approach identifies trends and the least favourable scenarios. However, it does not provide full statistical representativeness of the system response. Such representativeness would require extended Monte Carlo analyses. Therefore, the results should be interpreted mainly in comparative and qualitative terms. They are not a statistically complete description of attenuation effectiveness scatter. In contrast to reports in the literature [12], this work used realistic tolerances for specific manufacturing

(ok. 360–370 Hz) i osiąga wartość rzędu 35 dB, przy jednoczesnym znacznym spłaszczeniu charakterystyki w bezpośrednim sąsiedztwie częstotliwości rezonansowej struktury idealnej. W przypadku rezonatorów ALU-PG maksimum TL jest wyraźnie mniejsze i osiąga ok. 18 dB oraz zlokalizowane w zakresie 375–385 Hz. W porównaniu z wariantem PLA-PG odpowiedź wariantu ALU-PG ma węższe pasmo oddziaływania i mniejszą amplitudę, a przebieg charakterystyki jest bardziej wygładzony. W obu przypadkach uwzględnienie tolerancji geometrycznych prowadzi do redukcji TL oraz przesunięcia częstotliwości maksymalnego tłumienia względem symulacji referencyjnej.

### Wnioski i podsumowanie

Przeprowadzone analizy wskazują, że w rozpatrywanym modelu akustycznym skuteczność izolacyjna barier na bazie kryształów dźwiękowych jest w dominującym stopniu determinowana geometrią układu oraz wrażliwością tej geometrii na odchyłki wykonawcze. Oznacza to, że zwiększenie tłumienia przenoszenia może być osiągnięte przede wszystkim przez świadome kształtowanie parametrów geometrycznych rozpraszaczy i rezonatorów oraz uwzględnianie ograniczeń technologicznych już na etapie projektowania. Różnice pomiędzy wariantami PLA i ALU należy interpretować przede wszystkim jako efekt odmiennych zakresów tolerancji związanych z przyjętą technologią wykonania, a nie jako bezpośredni efekt właściwości materiałów konstrukcyjnych.

W przeciwieństwie do klasycznych struktur SC, lokalnie rezonujące kryształy dźwiękowe wykazują istotną podatność na odchyłki geometryczne. Nawet relatywnie niewielkie tolerancje wykonania prowadzą do rozstrojenia rezonansów indywidualnych komórek, co skutkuje zmniejszeniem efektywnej izolacyjności całej bariery. Wskazuje to na konieczność stosowania procedur projektowych uwzględniających tolerancje już na etapie optymalizacji geometrii. Zaobserwowano, że lokalna obecność rezonansu w pojedynczych elementach LRSC nie gwarantuje poprawy izolacyjności akustycznej w sensie globalnym. Efektywne tłumienie dźwięku wymaga zachowania koherencji rezonansowej pomiędzy komórkami, co zostało jednoznacznie zaburzone w przypadkach granicznych i losowych realizacjach tolerancji. Wniosek ten ma bezpośrednie znaczenie w przypadku projektowania układów, w których niejednorodności montażowe są trudne do całkowitego wyeliminowania.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że symulacje numeryczne stanowią użyteczne narzędzie do jakościowej oceny wpływu tolerancji wykonania i losowości strukturalnej na tłumienie przenoszenia w barierach na bazie kryształów dźwiękowych. Należy podkreślić, że ocena ta została przeprowadzona na ograniczonym zbiorze realizacji geometrycznych, obejmującym dwa przypadki losowe oraz jeden przypadek graniczny. Takie podejście pozwala na identyfikację trendów oraz scenariuszy najbardziej niekorzystnych, ale nie zapewnia pełnej reprezentatywności statystycznej odpowiedzi układu, jaką można uzyskać w rozbudowanych analizach Monte Carlo. W konsekwencji uzyskane wyniki należy interpretować przede wszystkim w kategoriach porównawczych i jakościowych, a nie jako statystycznie wyczerpujący opis rozrzutu

technologies. Those reports analysed centimetre scale randomness and many realisations. Here, the focus was on FDM 3D printing and aluminum elements. This increases the practical usefulness of the results. It also limits direct comparability with studies based on large assembly randomness.

Additional limitations follow from simplifications in numerical modelling. They are especially important for locally resonant structures. The FEM models assumed idealised boundary conditions. They did not fully include viscothermal losses in narrow resonator necks, material losses, or micro nonuniformities caused by 3D printing. These factors may overestimate maximum attenuation. They may also shift resonance frequencies compared with experimental results. This agrees with observations reported in the author's earlier work [6]. For this reason, conclusions about LRSC structures should be interpreted with caution. The emphasis should be on stability and repeatability of attenuation, not only on peak TL values. These limitations indicate directions for further research. They include broader statistical analyses, integration of acoustic models with flow loss assessment, and scaling of structures to real conditions.

*This paper was completed on the basis of results of a research task supported from the resources of the Ministry of Science, subsided from funds intended for the maintenance and progress of the research and didactic potential. task no.: II-42 Entitled: Optimization of a lattices of sound scatterers to increase sound insulation of acoustic barriers based on sonic crystals. The Central Institute for Labour Protection – National Research Institute is the Programme's main coordinator.*

Received: 05.01.2026  
Revised: 09.03.2026  
Published: 21.05.2026

skuteczności tłumienia. W przeciwieństwie do doniesień literaturowych [12], w których analizowano losowość rzędu centymetrów i dużą liczbę realizacji, w artykule skupiono się na tolerancjach realistycznych w przypadku konkretnych technologii wytwarzania (druk 3D FDM oraz elementy aluminiowe). Zwiększa to praktyczną użyteczność wyników, ale ogranicza ich bezpośrednią porównywalność z badaniami bazującymi na dużej losowości montażowej.

Dodatkowym ograniczeniem są uproszczenia przyjęte w modelowaniu numerycznym, szczególnie istotne w przypadku struktur lokalnie rezonujących. W modelach FEM założono idealizowane warunki brzegowe oraz nie uwzględniono w pełnym zakresie strat lepkotermicznych w wąskich szyjkach rezonatorów, strat materiałowych ani mikroniejednorodności wynikających z technologii druku 3D. Czynniki te mogą prowadzić do zawyżania wartości maksymalnego tłumienia oraz przesunięć częstotliwości rezonansowych w porównaniu z wynikami eksperymentalnymi, co jest zgodne z obserwacjami zawartymi w [6]. Z tego względu wnioski dotyczące struktur LRSC powinny być interpretowane ostrożnie, z naciskiem na stabilność i powtarzalność efektu tłumienia, a nie wyłącznie na wartości szczytowe TL. Wskazane ograniczenia wyznaczają kierunki dalszych badań, obejmujące zarówno rozszerzenie analiz statystycznych, jak i integrację modeli akustycznych z oceną strat przepływu oraz skalowania struktur do warunków rzeczywistych.

*Zrealizowano na podstawie wyników zadania badawczego finansowanego przez Ministerstwo Nauki z subwencji ze środków finansowych na utrzymanie i rozwój potencjału dydaktycznego i badawczego. Zadanie nr II-42 pt. Optymalizacja sieci krystalicznych rozpraszaczy dźwięku w celu zwiększenia izolacyjności akustycznej barier akustycznych opartych o kryształy soniczne. Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.*

Artykuł wpłynął do redakcji: 05.01.2026 r.  
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 09.03.2026 r.  
Opublikowano: 21.05.2026 r.

## Literature

- [1] Onrubia-Fontangordo L, Bravo Plana-Sala JM, Sánchez-Pérez JV, Castiñeira-Ibáñez S. Enhancing Helmholtz Resonance Prediction in Acoustic Barriers Based on Sonic Crystals. *Applied Sciences*. 2025. DOI: 10.3390/app151910675.
- [2] Elford DP, Chalmers L, Kusmartsev FV, Swallowe GM, Matryoshka locally resonant sonic crystal. *J. Acoust. Soc. Am.* 2011. DOI: 10.1121/1.3643818.
- [3] Radosz J. Acoustic performance of noise barrier based on sonic crystals with resonant elements. *Applied Acoustics*. 2019. DOI: 10.1016/j.apacoust.2019.06.003.
- [4] Radosz J. Periodic sound scatterers structures with Helmholtz resonators in ventilation ducts. *Materiały Budowlane*. 2025. DOI: 10.15199/33.2025.08.24.
- [5] Bi S et al. Effects of Aperture Shape on Absorption Property of Acoustic Metamaterial of Parallel-Connection Helmholtz Resonator. *Materials*. 2023. DOI: 10.3390/ma16041597.
- [6] Papadakis NM, Stavroulakis GE. Tunable Helmholtz Resonators Using Multiple Necks. *Micromachines*. 2023. DOI: 10.3390/mi14101932.
- [7] Kim W, Oh B, Rho J, W. Moon W. An accurate measurement of parametric array using a spurious sound filter topologically equivalent

- to a half-wavelength resonator. *Applied Acoustics*. 2025. DOI: 10.1016/j.apacoust.2025.110910.
- [8] Turner BM, Gold SA. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. *Rapid Prototyping Journal*. 2015. DOI: 10.1108/RPJ-02-2013-0017.
- [9] Wu L-Y, Chen L-W. Propagation of acoustic waves in the woodpile sonic crystal with a defect. *Applied Acoustics*. 2012. DOI: 10.1016/j.apacoust.2011.10.002.
- [10] Langfeldt F, Hoppen H, Gleine W. Resonance frequencies and sound absorption of Helmholtz resonators with multiple necks. *Applied Acoustics*. 2019. DOI: 10.1016/j.apacoust.2018.10.021.
- [11] Zhang H, Mahabadi RK, Rudin C, Guilleminot J, Brinson LC. Uncertainty quantification of acoustic metamaterial bandgaps with stochastic material properties and geometric defects. *Computers & Structures*. 2024. DOI: 10.1016/j.compstruc.2024.107511.
- [12] D'Orazio T, Asdrubali F, Godinho L, Veloso M, Amado-Mendes P. Experimental and Numerical Analysis of Wooden Sonic Crystals Applied as Noise Barriers. *Environments*. 2023. DOI: 10.3390/environments10070116.