

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)

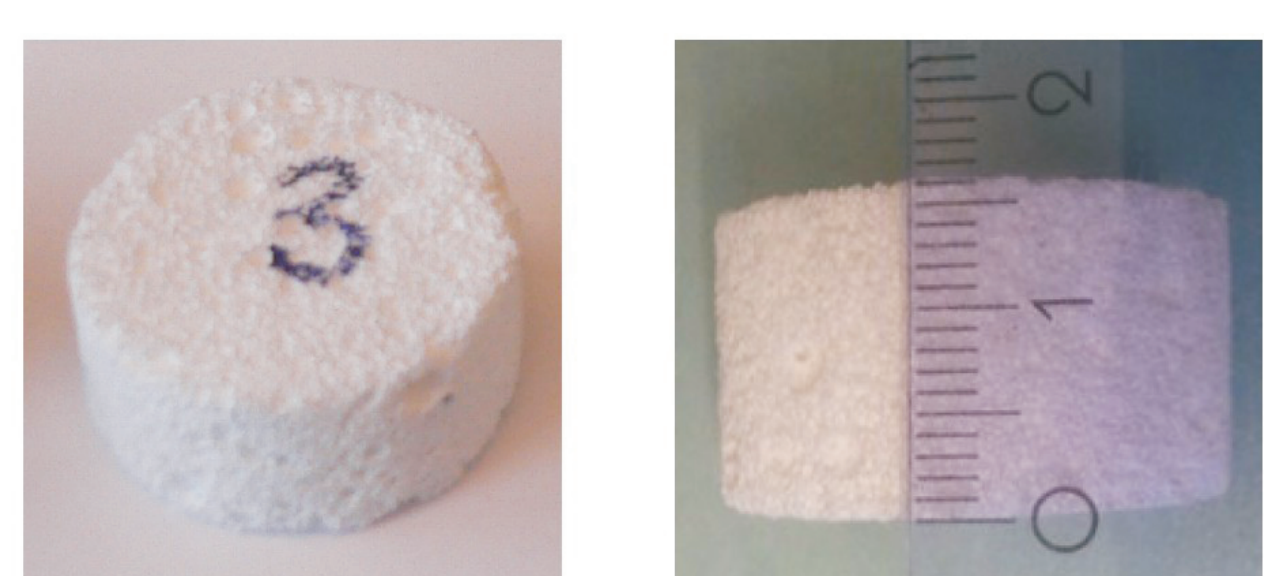
Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Politechnika Śląska, Instytut Lotnictwa w Warszawie
Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk

Wyniki badań Results

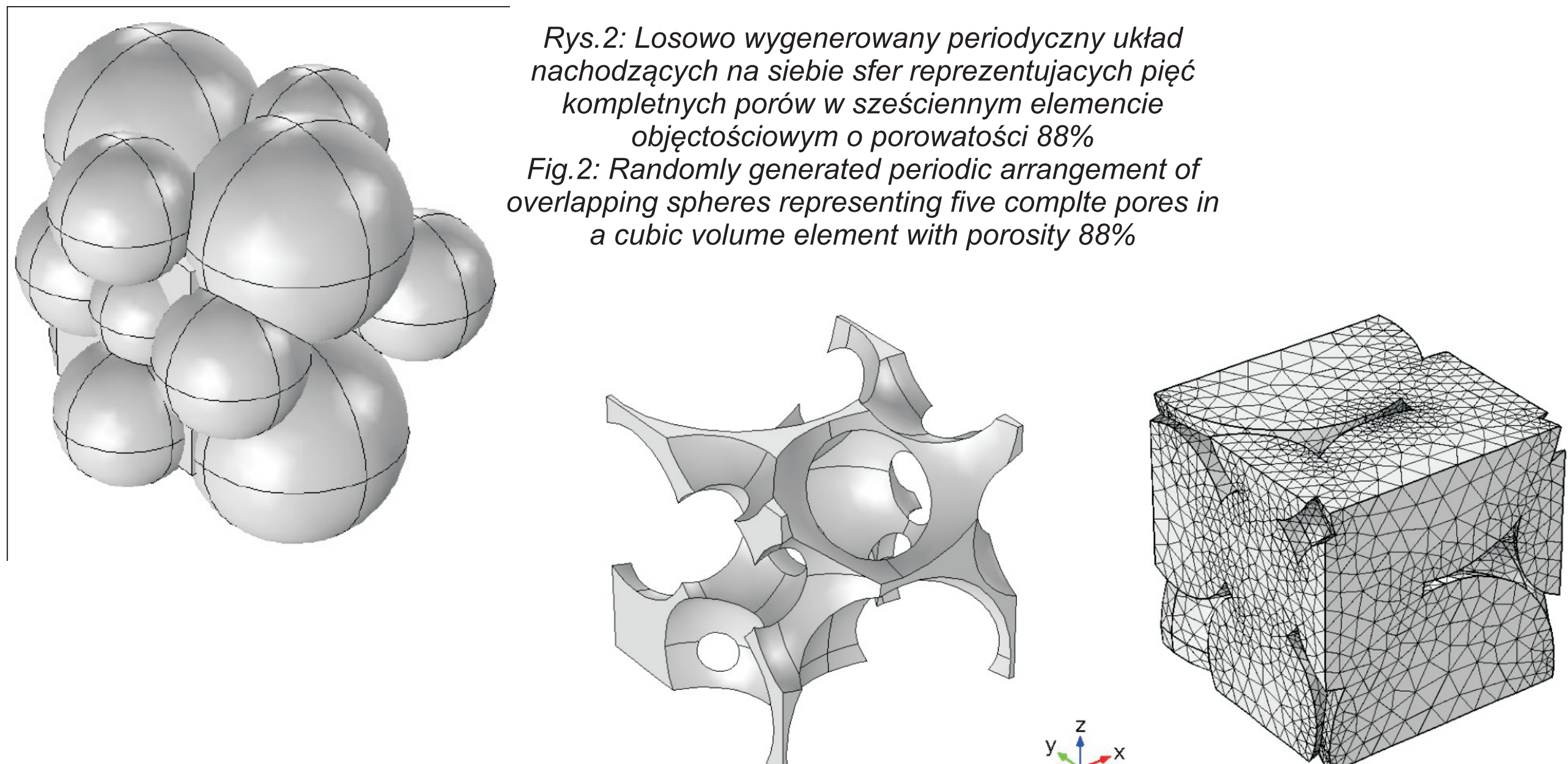
Mikrogeometria reprezentatywna, modelowanie wieloskalowe oraz badania eksperymentalne dźwiękochłonności pianki ceramicznej o porowatości 88%

Representative microgeometry, multiscale modelling and experimental testing for sound absorbing ceramic foam with porosity 88%

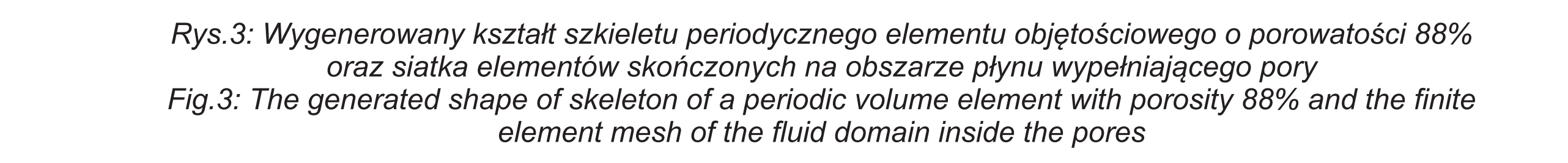
Z korundowej pianki ceramicznej (Al₂O₃) o stosunkowo wysokiej porowatości otwartej 88% i grubości 16.5mm została wycięta cylindryczna próbka o średnicy 29mm (Rys.1), dopasowanej do pomiarowej rury impedancyjnej, w której został pomierzony współczynnik pochłaniania dźwięku. Wcześniej stwierdzono dla tego typu pianki, że jej pory mają kulisty, a okna okrągły kształt, oraz że średni rozmiar (uśredniona średnica) porów wynosi 0.380 mm, natomiast średni rozmiar okien to 0.060 mm, co daje bardzo mały stosunek rozmiaru okien do rozmiaru porów wynoszący 0.016. Okazało się przy tym, że pory mają bardzo zróżnicowane rozmiary, co oznacza, że potrzeba wielu różnych porów w elemencie reprezentatywnym, aby dobrze odwzorować rzeczywistą mikrostrukturę. Ze względu na ograniczenia związane z kosztami obliczeń numerycznych zdecydowano się na wygenerowanie periodycznego elementu objętościowego z tylko pięcioma kompletnymi porami (Rys.2 i Rys.3), który może być tylko do pewnego stopnia reprezentatywny dla badanej pianki ceramicznej. Rozpatrzono zatem dwa przypadki: RVE-1: Reprezentatywny Element Objętościowy o wygenerowanej periodycznej geometrii z pięcioma porami i porowatością 88% (Rys.3), z rozmiarem dobranym w ten sposób, że średnia średnica porów wynosi 0.380 mm, czyli jest równa średniemu rozmiarowi porów pianki korundowej; przy tak dobranym wymiarze komórki reprezentatywnej średni rozmiar okien łączących pory wyniósł 0.175mm; RVE-2: Reprezentatywny Element Objętościowy o tym samym kształcie (Rys.3), lecz wymiarze komórki przeskalowanym tak, że średni rozmiar (z pięciu) porów jest równy 0.300mm, a średnia średnica okien łączących pory wynosi 0.139mm.



Rys.1: Próbka korundowej pianki ceramicznej o porowatości otwartej 88%, średnicy 29mm i wysokości 16,5mm (wymiar próbki przystosowane do pomiarów w rurze impedancyjnej).
Fig.1: A sample of corundum ceramic foam with open porosity 88%, diameter 29mm and height 16.5mm (the dimensions of sample are set to fit the sample into the impedance tube)



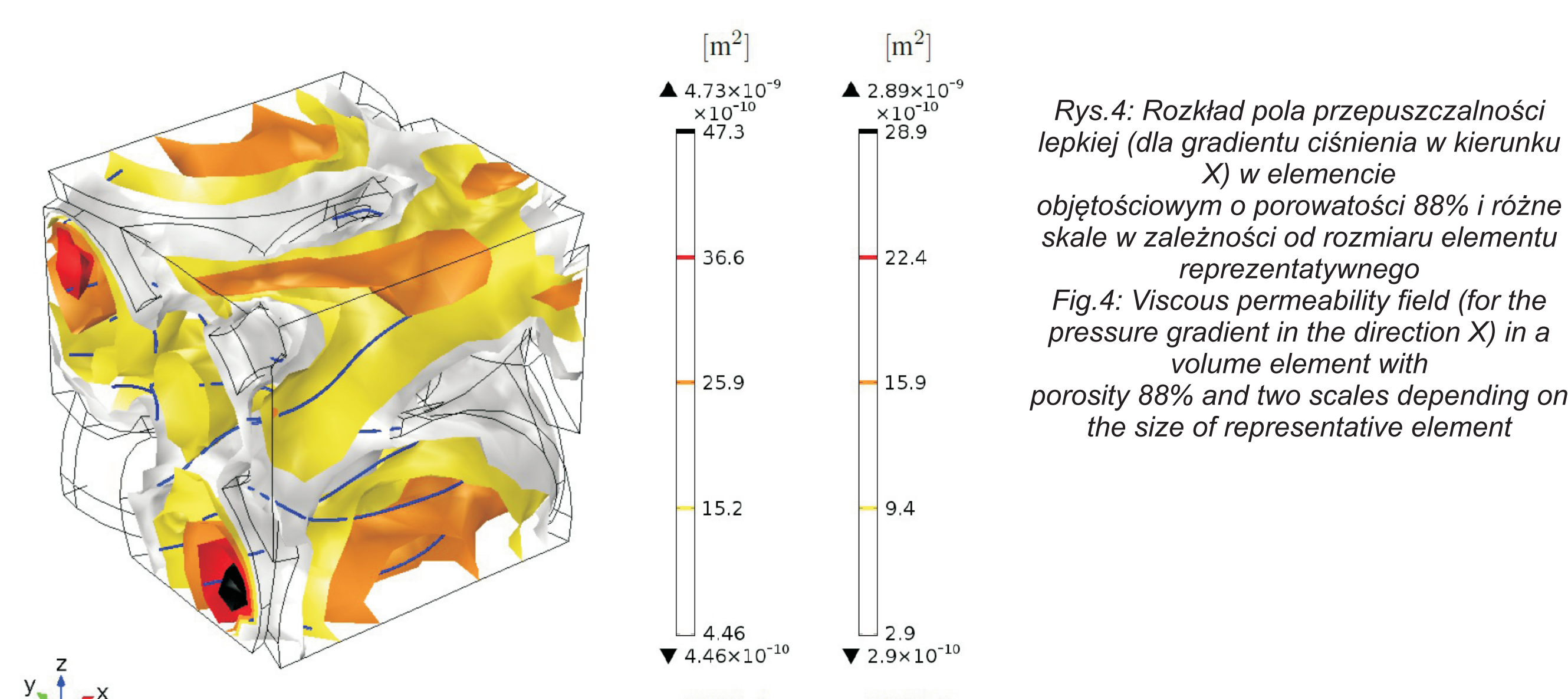
Rys.2: Losowo wygenerowany periodyczny układ nachodzących na siebie sfer reprezentujących pięć kompletnych porów w sześciennym elemencie objętościowym o porowatości 88%
Fig.2: Randomly generated periodic arrangement of overlapping spheres representing five complete pores in a cubic volume element with porosity 88%



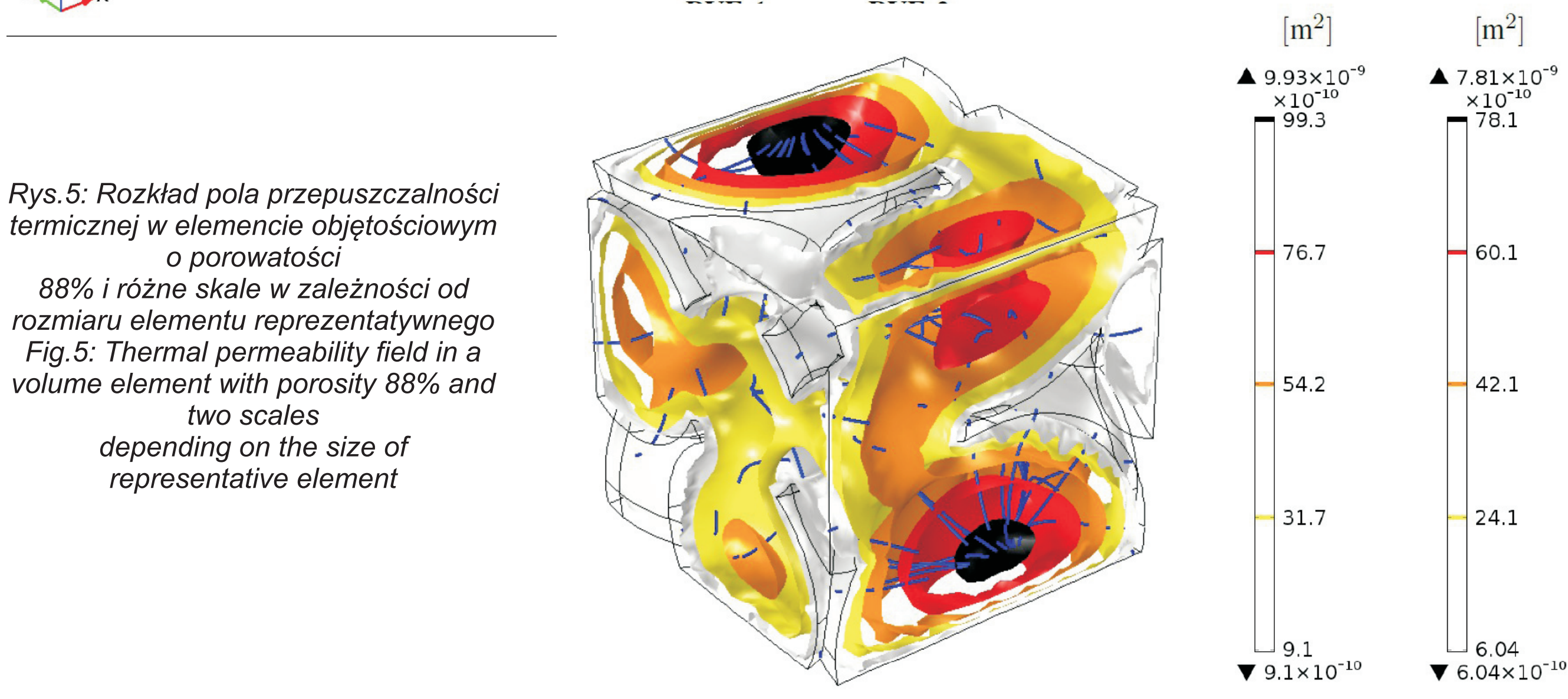
Rys.3: Wygenerowany kształt szkieletu periodycznego elementu objętościowego o porowatości 88% oraz siatka elementów skończonych na obszarze płynu wypełniającego pory
Fig.3: The generated shape of skeleton of a periodic volume element with porosity 88% and the finite element mesh of the fluid domain inside the pores

Reprezentatywne elementy objętościowe, RVE-1 i RVE-2, posłużyły do wyznaczenia mikrostrukturalnych parametrów transportu wykorzystywanych przez model Johnson-Champoux-Allard-Pride-Lafarge (JCAPL) dla propagacji i pochłaniania fal akustycznych w ośrodkach porowatych i włóknistych o sztywnym szkielecie i porowatości otwartej. W tym celu, dla obu reprezentacji RVE-1 i RVE-2, na periodycznym obszarze płynu wypełniającego pory (Rys.3 wykonano po trzy analizy Metodą Elementów Skończonych, rozwiązując następujące zagadnienia:

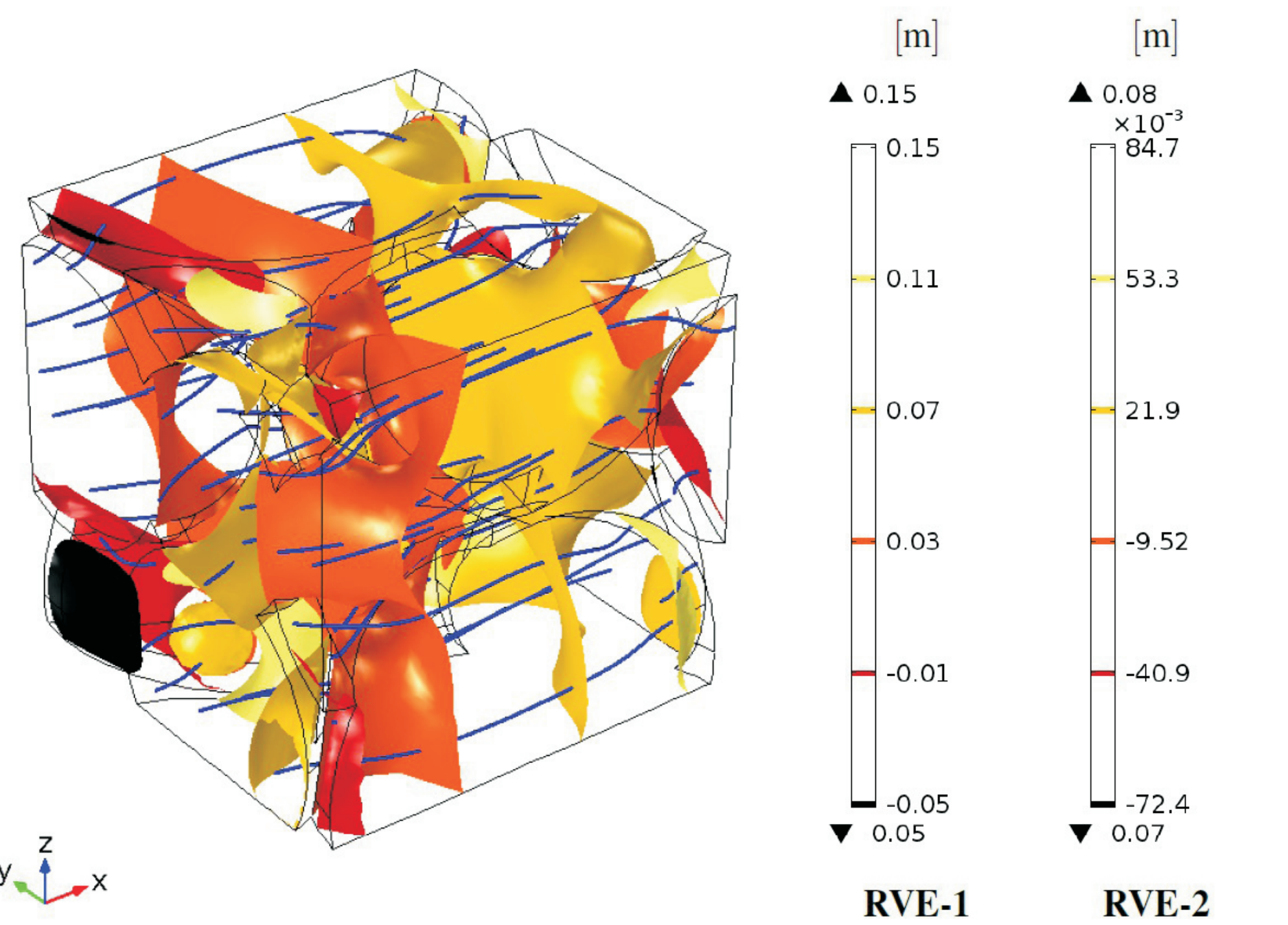
- (1) nieściśliwy, lepki przepływ ustalony (tzw. przepływ Stokes'a), wymuszony jednostkowym i równomiernym na całym obszarze płynu gradientem ciśnienia działającym na kierunku X przy warunkach brzegowych braku przślizgu na ściankach szkieletu (Rys.4);
- (2) ustalony przepływ ciepła, wymuszony przez jednostkowe źródło równomierne na całym obszarze płynu, przy izotermicznych warunkach brzegowych na ściankach szkieletu (Rys.5);
- (3) zagadnienie Laplace'a na przeskalowany potencjał pola elektrycznego, wynikające z problemu przewodnictwa elektrycznego, w którym rozkład pola elektrycznego w obszarze płynu wypełniającego pory jest wyznaczany przy założeniu, że płyn ten jest elektrycznie przewodzący, natomiast szkielet materiału porowatego jest izololatorem, a wymuszeniem jest jednostkowy gradient potencjału elektrycznego działający równomiernie w całym obszarze płynu na kierunku X (Rys.6).



Rys.4: Rozkład pola przepuszczalności lepkiej (dla gradientu ciśnienia w kierunku X) w elemencie objętościowym o porowatości 88% i różne skale w zależności od rozmiaru elementu reprezentatywnego
Fig.4: Viscous permeability field (for the pressure gradient in the direction X) in a volume element with porosity 88% and two scales depending on the size of representative element



Rys.5: Rozkład pola przepuszczalności termicznej w elemencie objętościowym o porowatości 88% i różne skale w zależności od rozmiaru elementu reprezentatywnego
Fig.5: Thermal permeability field in a volume element with porosity 88% and two scales depending on the size of representative element

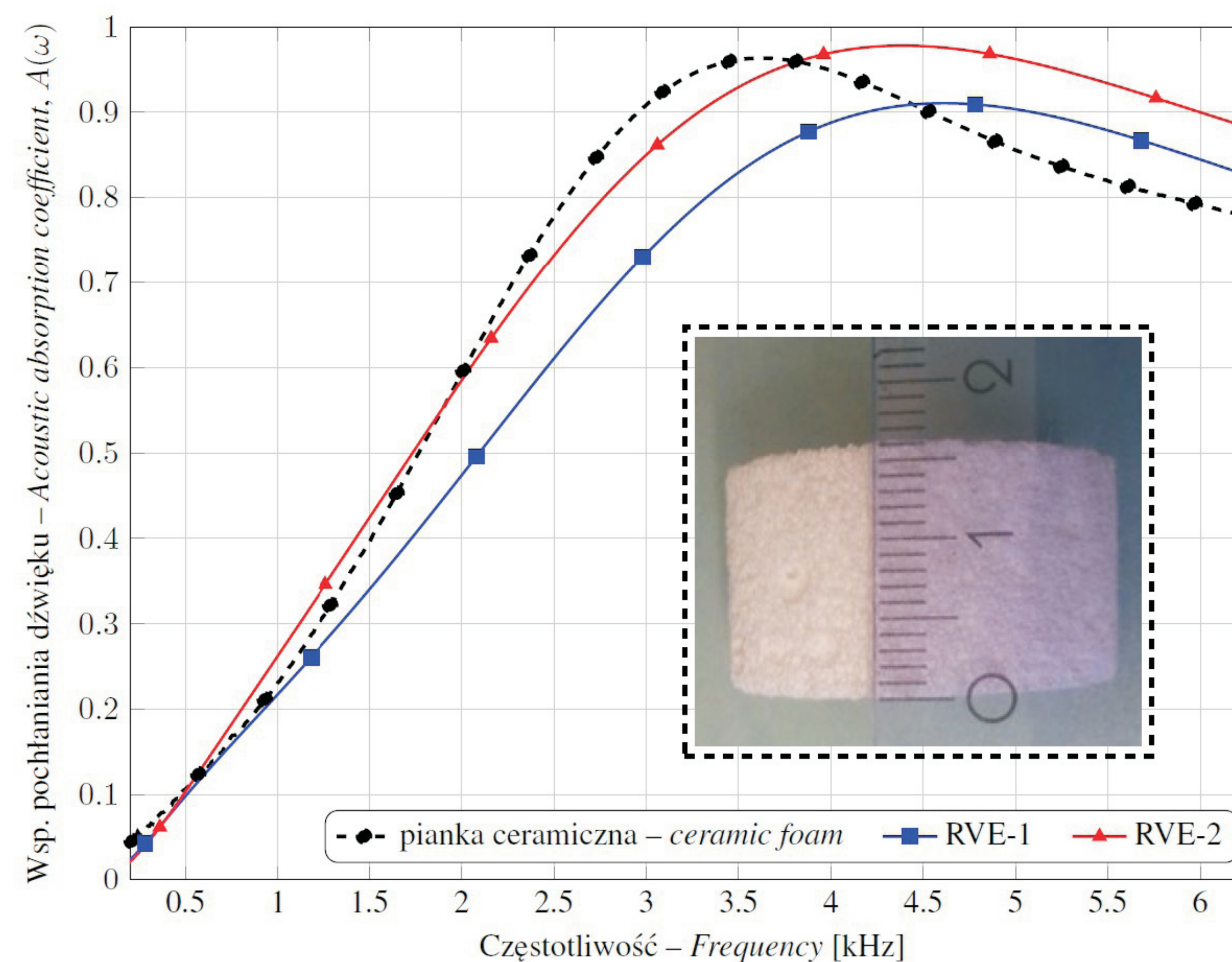


Rys.6: Rozkład pola przeskalowanego potencjału elektrycznego (dla wektora zewnętrznego pola elektrycznego na kierunku X) w elemencie objętościowym o porowatości 88% i różne skale w zależności od rozmiaru elementu reprezentatywnego
Fig.6: Scaled field of electric potential (for the vector of the external electric field in the direction X) in a volume element with porosity 88% and two scales depending on the size of representative element

Rozwiązania w postaci odpowiednich pól zdefiniowanych na obszarze płynu wypełniającego pory (Rys.4, 5 i 6), uśredniono po elementach objętościowych RVE-1 i RVE-2, a następnie stosując odpowiednie wzory wyznaczono dla obu przypadków makroskopowe parametry transportu wynikające z mikrostruktury materiału, które przedstawiono w Tabeli 1. Parametry te pozwoliły wyznaczyć (stosując formuły modelu JCAPL) efektywną gęstość i moduł ściśliwości, a w konsekwencji efektywną prędkość dźwięku w materiale porowatym. To z kolei pozwoliło na rozwiązanie na poziomie makroskopowym zagadnienia Helmholtza w celu obliczenia powierzchniowej impedancji akustycznej dla warstwy materiału porowatego o grubości 16.5mm, którą wykorzystano do wyznaczenia współczynnika pochłaniania dźwięku. Rezultaty obliczeń wykonanych dla obu elementów reprezentatywnych RVE-1 i RVE-2 przedstawiono na Rys.7, gdzie porównano je z wynikiem otrzymanym z bezpośredniego pomiaru eksperymentalnego próbki ceramicznej

Tabela 1: Mikrostrukturalne parametry transportu – wartości dla dwóch reprezentatywnych elementów objętościowych o tym samym kształcie (i porowatości 88%), a różnym rozmiarze (średni porów)
Table 1: Microstructural transport parameters – values for two representative volume elements of the same shape (and porosity 88%), and different size (of pores' diameters)

Parametr – Parameter	Symbol	Wymiar Unit	RVE-1	RVE-2
porowatość (otwarta) (open) porosity	ϕ	%	87.92	87.92
krętość (dla ∞ Hz) (tortuosity (for ∞ Hz))	∞	–	1.264	1.266
krętość lepka dla 0 Hz (viscous tortuosity for 0 Hz)	α_0	–	1.892	1.898
krętość termiczna dla 0 Hz (thermal tortuosity for 0 Hz)	α'_0	–	1.346	1.405
przepuszczalność (lepka) (viscous) permeability	k_0	10 ⁻⁹ m ²	1.199	0.746
przepuszczalność termiczna (thermal) permeability	k'_0	10 ⁻⁹ m ²	3.999	2.845
długość charakt. lepka (viscous characteristic length)	Λ	10 ⁻⁶ m	125.2	97.60
długość charakt. termiczna (thermal characteristic length)	Λ'	10 ⁻⁶ m	240.9	190.2



Rys.7: Współczynnik pochłaniania dźwięku pomierzony dla próbki korundowej ceramiki o porowatości 88% i wyznaczony z analiz mikrostrukturalnych dwóch elementów reprezentatywnych o tym samym kształcie i nieco innym rozmiarze
Fig.7: Acoustic absorption coefficient measured for the corundum ceramic sample with porosity 88% and calculated from microstructural analyses of two representative volume elements of the same shape and slightly different size

Wnioski Conclusions

Wygenerowana periodyczna geometria mikrostrukturalna jest tylko do pewnego stopnia reprezentatywna dla badanej pianki ceramicznej, okazuje się jednak, że rezultaty modelowania numerycznego są dosyć zbliżone do wyników pomiarów próbki w rurze impedancyjnej, gdyż najbardziej istotne parametry geometryczne, jak sama porowatość oraz średni rozmiar porów, są dokładnie takie same lub bardzo zbliżone do wielkości występujących w rzeczywistej piance ceramicznej.

The generated geometry of microstructure is only weakly representative for the examined ceramic foam, however, the results of multiscale modelling are similar to the measurements carried out for the ceramic sample in an impedance tube, because the most important geometric parameters, like the porosity itself or the average size of pores, are exactly the same or fairly similar to the features of the real ceramic foam.

Wyniki badań Results

Badania doświadczalne testu ściskania pianek auksetycznych zostały przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej MTS 647

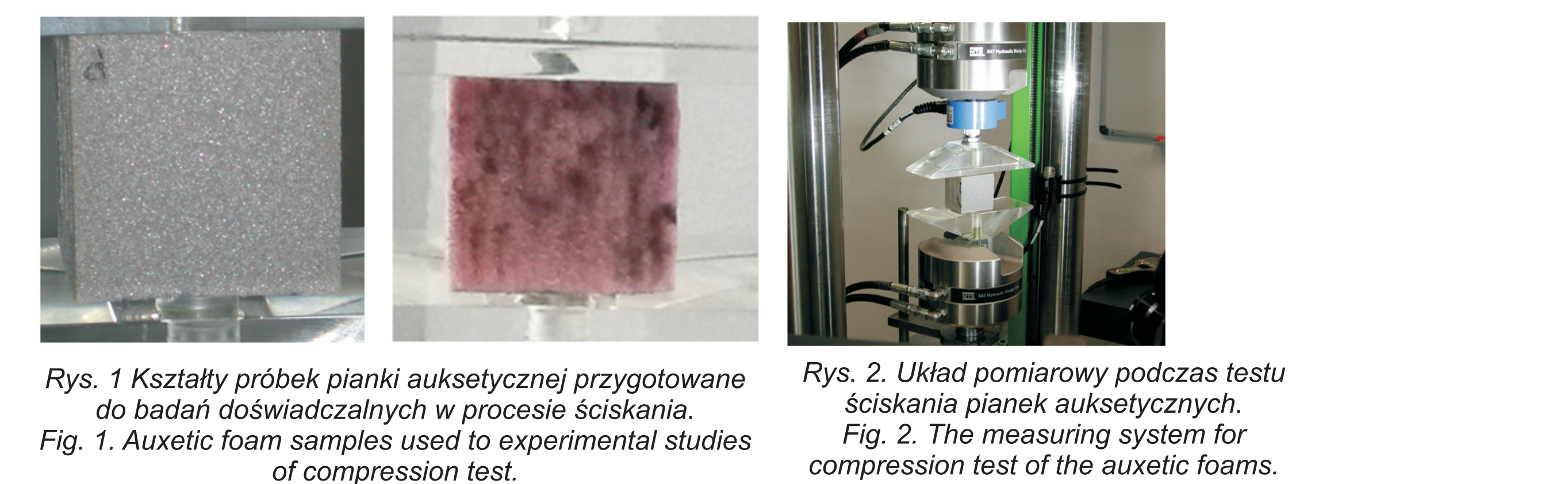
Experimental study of compression test for auxetic foam were carried out on the MTS 647 machine

Badania doświadczalne testu ściskania pianek auksetycznych zostały przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej MTS 647 przedstawionej na Rys. 2. Do pomiaru przemieszczeń wykorzystano system ARAMIS 4M, który pozwolił na uzyskanie przestrzennych map przemieszczeń. Stosowano dwa rodzaje pianek, których próbki miały kształt prostopadłościenny Rys.1. Parametry badanych podano w Tab. 1. Dla każdej badanej próbki zostały przeprowadzone trzy niezależne testy ściskania dla trzech prostopadłych kierunków.

Experimental study of compression test for auxetic foam were carried out on the MTS 647 machine which is shown in Fig. 2. For the measurement of displacements ARAMIS 4M system was used, which allowed for obtaining spatial displacement distributions maps. For two kinds of foams the samples have a cuboid shape were used in experiment, Fig.1. For each sample, three independent compression tests were performed in three orthogonal direction

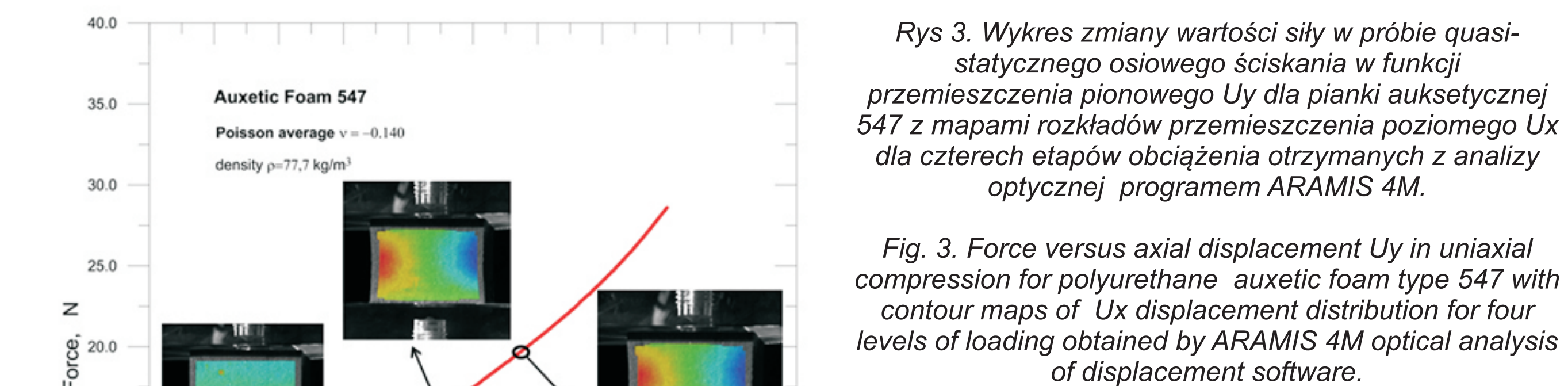
Każda z badanych próbek została umieszczona między dwa specjalnie wykonane uchwyty maszyny wytrzymałościowej. Górny uchwyt pozostawał w spoczynku bez możliwości przemieszczenia się, natomiast uchwyt dolny połączony z trawersą maszyny przemieszczał się w kierunku pionowym powodując ściskanie pianki auksetycznej. Pomiar wartości przemieszczeń był rejestrowany zarówno przez maszynę wytrzymałościową MTS 647 oraz za pomocą systemu ARAMIS 4M. Wszystkie badania eksperymentalne zostały przeprowadzone z prędkością odkształcenia 10-4 1/s. Maksymalne zadane przemieszczenie dla każdego testu wynosiło 15mm przy wymiarach próbek 50x50x50 mm.

	Pianka auksetyczna 540	Pianka auksetyczna 547
Typ pianki	poliuretanowa wiskozelastyczna V5030	poliuretanowa estrowa S364MD
Gęstość pozorna pianki wyciętej:	46.1 kg/m ³	30.6 kg/m ³
Gęstość pozorna pianki auksetycznej	84.5 kg/m ³	77.7 kg/m ³
Współczynnik kompresji objętościowej:	1,84	: 2,59
Średni współczynnik Poissona	-0,029	-0,140



Rys. 1: Kształty próbek pianki auksetycznej przygotowane do badań doświadczalnych w procesie ściskania.
Fig. 1: Auxetic foam samples used to experimental studies of compression test.

Wyniki badań doświadczalnych przedstawiono na Rys. 3. Uzyskane wyniki dla pianki auksetycznej 547 obrazują zmianę rozkładu przemieszczeń poziomych Ux dla czterech etapów obciążenia (oznaczonych na rysunku kółkami). Wraz ze wzrostem przemieszczenia pionowego Uy obserwowany jest efekt auksetyczny (przekrój pianki zmniejsza swój wymiar pod wpływem przyłożonego obciążenia ścisającego).



Rys.3: Wykres zmiany wartości siły w próbie quasi-stacjonarnej osiowego ściskania w funkcji przemieszczenia pionowego Uy dla pianki auksetycznej 547 z mapami rozkładów przemieszczenia poziomego Ux dla czterech etapów obciążenia otrzymanych z analizy optycznej programem ARAMIS 4M.
Fig. 3: Force versus axial displacement Uy in uniaxial compression for polyurethane auxetic foam type 547 with contour maps of Ux displacement distribution for four levels of loading obtained by ARAMIS 4M optical analysis of displacement software.

Wnioski Conclusions

Przeprowadzone badania doświadczalne pianek auksetycznych pozwoliły na określenie zmian wartości siły ściskającej na powierzchniach próbek w funkcji przemieszczeń osiowych dla poszczególnych pianek oraz mapy przemieszczeń i odkształceń. Otrzymane wyniki mogą być wykorzystane do zaprojektowania pianek auksetycznych o pożądanych własnościach.

The experimental results of auxetic foams behaviour allowed to determine relation between forces and displacements and deformation maps of polyurethane foams with negative Poisson's ratio. This results can be used in design expected properties of new auxetic foams.

Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

- Referaty:**
- Zieliński T.G.: "Multiscale modelling of the acoustic waves in rigid porous and fibrous materials". PCM-CMM-2015 – 3rd Polish Congress of Mechanics & 21st Computer Methods in Mechanics, September 8th-11th 2015, Gdańsk, Poland.
 - Zieliński T.G.: "On representativeness of the representative cells for the microstructure based predictions of sound absorption in fibrous and porous media". Proceedings of EURONOISE2015, 31st May – 3rd June 2015, Maastricht, The Netherlands.
 - Zieliński T.G.: "Microstructure generation for design of sound absorbing foams with spherical pores". SAPEM2014 – Symposium on the Acoustics of Porous-Elastic Materials, 16-18 December 2014, Stockholm, Sweden.
 - Zdzisław Nowak, Marcin Nowak, Ryszard B. Pęcherski, Marek Potoczek and Romana E. Śliwa, Numerical simulations of mechanical properties of alumina foams based on computer tomography, PCM-CMM-2015 – 3rd Polish Congress of Mechanics & 21st Computer Methods in Mechanics September 8th-11th 2015, Gdańsk, Poland

- Publikacje:**
- Zieliński T.G.: "Generation of random microstructures and prediction of sound velocity and absorption for open foams with spherical pores". Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 137, No. 4, pp. 1790-1801, 2015. DOI: 10.1121/1.4915475 [IF5: 1.817, IF: 1.555, MNISW: 35pkt.].
 - Z. Nowak, M. Nowak, R.B. Pęcherski, M. Potoczek, R.E. Śliwa, Mechanical properties of the ceramic open-cell foams of variable cell sizes, Archive of Metallurgy and Material, vol. 60 (4), 2015.
 - Zieliński T.G.: "Normalized inverse characterization of sound absorbing rigid porous media". Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 137, No. 6, 2015. [w druku, in press] DOI: 10.1121/1.4919806 [IF5: 1.817, IF: 1.555, MNISW: 35pkt.].

Prace mgr. dr. hab. Praca doktorska:
Marcin Nowak Analiza deformacji i zniszczenia struktur komórkowych w zastosowaniu do symulacji procesu infiltracji pianki korundowej ciekłym metalem. Promotor: dr hab. inż. Zdzisław Nowak
Obroniona 12.03.2015