(19) URZĄD PATENTOWY RZECZYPOSPOLITEJ POLSKIEJ

(10) **PL 245955 B1**

(12) # Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **443120**
(22) Data zgłoszenia: **2022.12.12**
(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2024.02.12 BUP 07/2024**
(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2024.11.04 WUP 45/2024**

(51) MKP:
G10K 11/168 *(2006.01)*
E04B 1/84 *(2006.01)*

(73) Uprawniony z patentu:
CENTRALNY INSTYTUT OCHRONY PRACY – PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY, Warszawa, PL

(72) Twórca(-y) wynalazku:
GRZEGORZ SZCZEPAŃSKI, Kazimierów, PL

(74) Pełnomocnik:
rzecz. pat. Adam Pawłowski, Łódź, PL

(54) Tytuł:
Metamateriał akustyczny

PL 245955 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest metamateriał akustyczny, przeznaczony w szczególności do zastosowania w ustrojach dźwiękochłonnych i dźwiękochłonno-izolacyjnych do redukcji hałasu na stanowiskach pracy i poprawy akustyki pomieszczeń.

Hałas jest najczęściej spotykanym czynnikiem szkodliwym na stanowiskach pracy. Do jego ograniczenia stosuje się metody techniczne oraz metody organizacyjne. W ramach metod technicznych wykonywane są często ustroje akustyczne, które mają za zadanie odbić lub pochłonąć dźwięki emitowane przez maszyny. Do takich ustrojów zaliczyć można obudowy dźwiękoszczelne, tłumiki akustyczne, ekrany dźwiękochłonne i inne rozwiązania pozwalające na redukcję hałasu na danym stanowisku pracy.

Aktualnie na rynku dominują materiały dźwiękochłonne w postaci wełny mineralnej i pianek poliuretanowych o różnym kształcie (niekiedy zakończone klinami lub wypustkami w kształcie fali) i gabarytach (najczęściej w formie znacznej wielkości prostopadłościanów). Z początkiem XXI wieku dostrzeżono, że wpływ ukształtowania struktury wewnętrznej ustroju dźwiękochłonnego na jego zdolność do pochłaniania dźwięku może być bardziej znaczący od wpływu właściwości samego materiału, który użyto do budowy takiego ustroju. Właściwości te zaobserwowano w przypadku materiałów umożliwiających lokalny rezonans fal dźwiękowych w wielu punktach wewnątrz materiału. Odkrycie to zostało wykorzystane do tworzenia różnego rodzaju materiałów tłumiących, szczególne z wykorzystaniem rezonatorów Helmholtza. Inną z zaobserwowanych właściwości była zmiana kierunku propagacji fali dźwiękowej w wyniku wydłużenia ścieżki jej przejścia (poprzez zastosowanie wielu niewielkich tuneli. Dotychczas te dwa mechanizmy były stosowane w konstrukcjach metamateriałów akustycznych (tj. materiałów których właściwości związane z kontrolą fali dźwiękowej wynikają przede wszystkim nie z właściwości samego materiału, ale z ukształtowania jego struktury wewnętrznej) w wielu ośrodkach badawczych na całym świecie.

Ogólną wadą tych rozwiązań jest wąski zakres częstotliwości, dla których uzyskują wysokie parametry pochłaniania dźwięku.

Celowym byłoby zatem opracowanie nowej konstrukcji metamateriału akustycznego, która zapewniłaby skuteczniejsze pochłanianie dźwięku dla szerszego zakresu częstotliwości niż dotychczas.

Przedmiotem wynalazku jest metamateriał akustyczny o właściwościach dźwiękochłonnych, zawierający wiele strukturalnych warstw rozmieszczonych równolegle względem siebie, charakteryzujący się tym, że zawiera co najmniej 10 warstw ze strukturalnym wypełnieniem, z których każda ma grubość nie większą niż 5 mm, przy czym gęstość struktury wypełnienia każdej kolejnej warstwy jest większa od gęstości poprzedzającej ją warstwy o nie więcej niż 2 punkty procentowe.

Dzięki zwiększającej się gęstości wypełnienia kolejnych warstw metamateriału akustycznego możliwe jest wytworzenie ustroju dźwiękochłonnego skutecznego dla szerokiego zakresu częstotliwości.

Przedmiot wynalazku został przedstawiony w przykładzie wykonania na rysunku, na którym:

- Fig. 1A przedstawia metamateriał akustyczny w formie walca w przykładzie wykonania;
- Fig. 1B przedstawia schematycznie ułożenie warstw metamateriału z fig 1A;
- Fig. 1C przedstawia przekroje poprzeczne kolejnych warstw 1–10 mających strukturę plastra miodu;
- Fig. 2 przedstawia przykładowe rozmieszczenie metamateriałów akustycznych względem źródła dźwięku;
- Fig. 3A przedstawia przykładowe wypełnienie struktury wewnętrznej metamateriału o postaci linii zygzakowatej;
- Fig. 3B przedstawia przykładowe wypełnienie struktury wewnętrznej metamateriału o postaci plastra miodu;
- Fig. 4 przedstawia schematycznie przykładowe rozmieszczenie mikrowarstw w jednej z warstw metamateriału;
- Fig. 5 przedstawia względne rozmieszczenie struktur mikrowarstw w jednej z warstw metamateriału.

Metamateriał akustyczny według wynalazku zawiera co najmniej 10 strukturalnych warstw rozmieszczonych równolegle względem siebie. Warstwy te mogą mieć wypełnienie przykładowo w postaci plastra miodu, jak przedstawiono na Fig. 3B, lub w postaci zygzakowatej jak przedstawiono na Fig. 3A, lub w postaci gyroidalnej jak przedstawiono na Fig. 3C, lub w postaci krzywej Hilberta jak przedstawiono

na Fig. 3D. Gęstość struktury wypełnienia każdej kolejnej warstwy 1–10 jest większa od gęstości poprzedzającej ją warstwy o nie więcej niż 2 punkty procentowe. Każda z warstw ma grubość h1 nie większą niż 5 mm. Korzystnie, choć niekoniecznie, wszystkie warstwy są tej samej grubości.

Przykładowo, metamateriał może zostać wytworzony za pomocą technologii druku addytywnego w technologii FDM (Fused Deposiotion Modeling) lub FFF (Fused Filament Fabrication). Metamateriał może przyjąć dowolną formę, przykładowo może mieć postać prostopadłościanu, walca, ostrosłupa lub dowolną inną objętość w przestrzeni 3D. Jako materiału do wytworzenia metamateriału akustycznego można użyć dowolnie wybranego materiału (odpowiedniego jako filament dla technologii druku 3D) o właściwościach niezbędnych do danego zastosowania (takich jak odporność materiału na działanie promieni UV, odporność na wysokie temperatury i inne).

Warstwy metamateriału akustycznego powinny być rozmieszczone w kierunku, z którego nadchodzi hałas, tj. płaszczyzna główna metamateriału akustycznego powinna być prostopadła do kierunku, z którego nadchodzi hałas.

Fig. 2 przedstawia wskazane umieszczenie metamateriałów akustycznych 30 (metamateriał w formie kuli) i 40 (metamateriał w formie prostopadłościanu) względem źródła dźwięku 50. Płaszczyzny warstw są ustawione prostopadle względem kierunku rozchodzenia się fali akustycznej 51, przy czym warstwa o najmniejszej gęstości znajduje się od strony źródła emitującego hałas 50.

Co najmniej jedna z warstw 1–10 może być złożona z mikrowarstw 1.X–10.X o grubości h2 od 0.05 do 0.3 mm, o takiej same strukturze i gęstości wypełnienia jak dana warstwa 1–10, przy czym struktury kolejnych mikrowarstw 1.X–10.X mogą być obrócone względem siebie o kąt α wynoszący do 180 stopni. Przykładowo, Fig. 4 i 5 przedstawiają względne rozmieszczenie struktur mikrowarstw w jednej z warstw 4 metamateriału. W tym przykładzie, warstwa 4 zawiera pięć mikrowarstw 4.1–4.5 o strukturze plastra miodu i o grubości h2 równej 0.3 mm każda, przy czym struktury kolejnych mikrowarstw 4.1–4.5 są obrócone względem siebie o kąt α wynoszący 5 stopni.

Przykład wykonania 1

Wykonano metamateriał akustyczny zawierający 49 warstw o strukturze plastra miodu, każda o grubości h1 równej 2 mm. Pierwsza warstwa (licząc od strony przeznaczonej do skierowania w kierunku źródła hałasu) nie posiadała wypełnienia (gęstość wypełnienia równa 0%), kolejna miała gęstość wypełnienia równą 2%, a każda kolejna o 2 punkty procentowe więcej, tak że ostatnia warstwa miała gęstość wypełnienia 100%. Wysokość metamateriału akustycznego wynosiła zatem 100 mm. Wypełnienie warstw (poza ostatnią, która była lita i poza pierwszą, która nie posiadała wypełnienia) miało strukturę plastra miodu (nie zastosowano mikrowarstw). Do wykonania metamateriału akustycznego wykorzystano technologię druku addytywnego z dyszą o średnicy 0,4 mm i filamentu o średnicy 1,75 mm. Jako materiał przyjęto polilaktyd (PLA). Utworzony metamateriał akustyczny charakteryzował się współczynnikiem pochłaniania dźwięku powyżej 0,9 w zakresie częstotliwości od 800 Hz do 5 kHz.

Przykład wykonania 2

Wykonano metamateriał akustyczny zawierający 25 warstw o strukturze plastra miodu, każda o grubości h1 równej 2 mm. Pierwsza warstwa (licząc od strony przeznaczonej do skierowania w kierunku źródła hałasu) miała gęstość wypełnienia 2%, a każda kolejna o 2 punkty procentowe więcej, tak, że ostatnia warstwa miała gęstość wypełnienia 50%. Wysokość metamateriału akustycznego wynosiła zatem 50 mm. Wypełnienie warstw miało strukturę plastra miodu (nie zastosowano mikrowarstw). Do wykonania metamateriału akustycznego wykorzystano technologię druku addytywnego z dyszą o średnicy 0,4 mm i filament o średnicy 1,75 mm. Jako materiał przyjęto materiał gumopodobny (nanokompozyt z dodatkiem miedzi). Utworzony metamateriał akustyczny charakteryzował się współczynnikiem pochłaniania dźwięku powyżej 0,7 w zakresie częstotliwości od 2 kHz do 5 kHz.

Zastrzeżenia patentowe

1. Metamateriał akustyczny o właściwościach dźwiękochłonnych, zawierający wiele strukturalnych warstw rozmieszczonych równolegle względem siebie, **znamienny tym**, że zawiera co najmniej 10 warstw (1–10) ze strukturalnym wypełnieniem, z których każda ma grubość (h1) nie większą niż 5 mm, przy czym gęstość struktury wypełnienia każdej kolejnej warstwy (1–10) jest większa od gęstości poprzedzającej ją warstwy o nie więcej niż 2 punkty procentowe.

2. Metamateriał akustyczny według zastrzeżenia 1 **znamienny tym**, że strukturalne wypełnienie warstw (1–10) ma postać plastra miodu.
3. Metamateriał akustyczny według zastrzeżenia 1 **znamienny tym**, że strukturalne wypełnienie warstw (1–10) ma postać linii zygzakowatej.
4. Metamateriał akustyczny według zastrzeżenia 1 **znamienny tym**, że strukturalne wypełnienie warstw (1–10) ma postać gyroidalną.
5. Metamateriał akustyczny według zastrzeżenia 1 **znamienny tym**, że strukturalne wypełnienie warstw (1–10) ma postać krzywej Hilberta.
6. Metamateriał akustyczny według dowolnego z zastrzeżeń 1–3 **znamienny tym**, że co najmniej jedną z warstw (1–10) tworzą mikrowarstwy (1.X–10.X) o grubości (h2) od 0.05 do 0.3 mm, o tej same strukturze i gęstości wypełnienia co dana warstwa (1–10), przy czym struktury kolejnych mikrowarstw (1.X–10.X) są obrócone względem siebie o kąt (α) wynoszący do 180 stopni.
7. Metamateriał akustyczny według dowolnego z zastrzeżeń od 1 do 6 **znamienny tym,** że ma kształt prostopadłościanu.
8. Metamateriał akustyczny według dowolnego z zastrzeżeń od 1 do 6 **znamienny tym**, że ma kształt kuli.
9. Metamateriał akustyczny według dowolnego z zastrzeżeń od 1 do 6 **znamienny tym**, że ma kształt walca.
10. Metamateriał akustyczny według dowolnego z zastrzeżeń od 1 do 9 **znamienny tym**, że jest wykonany w technologii druku addytywnego.

Rysunki

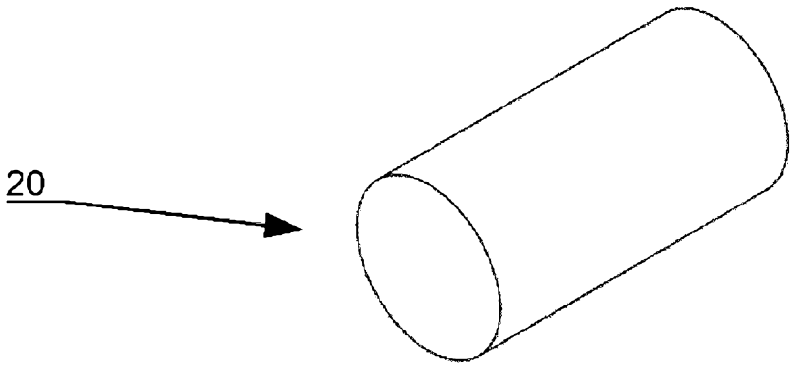

Fig. 1A

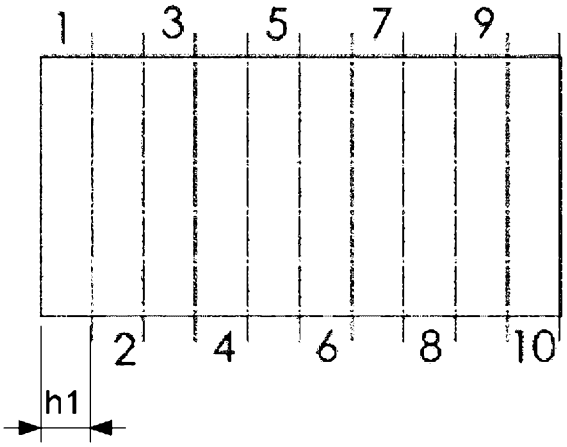

Fig. 1B

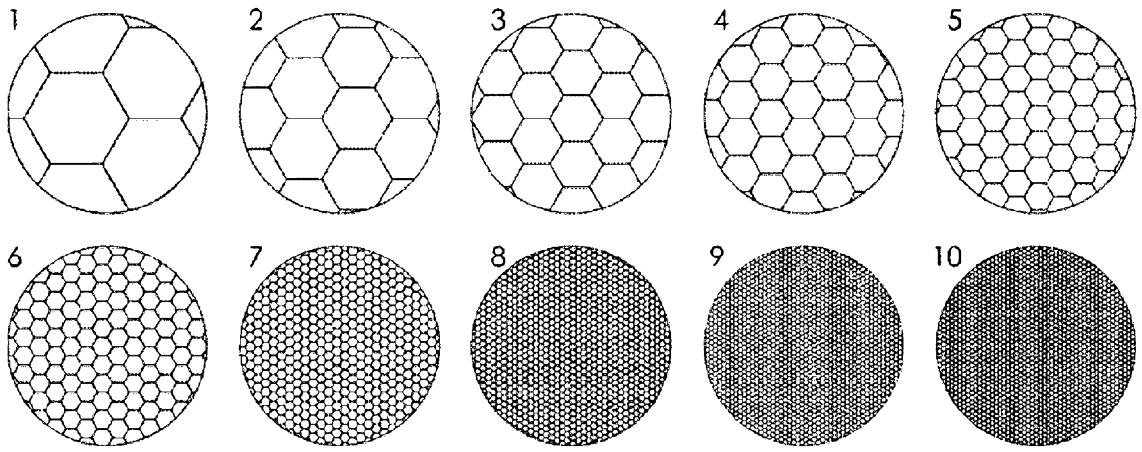

Fig. 1C

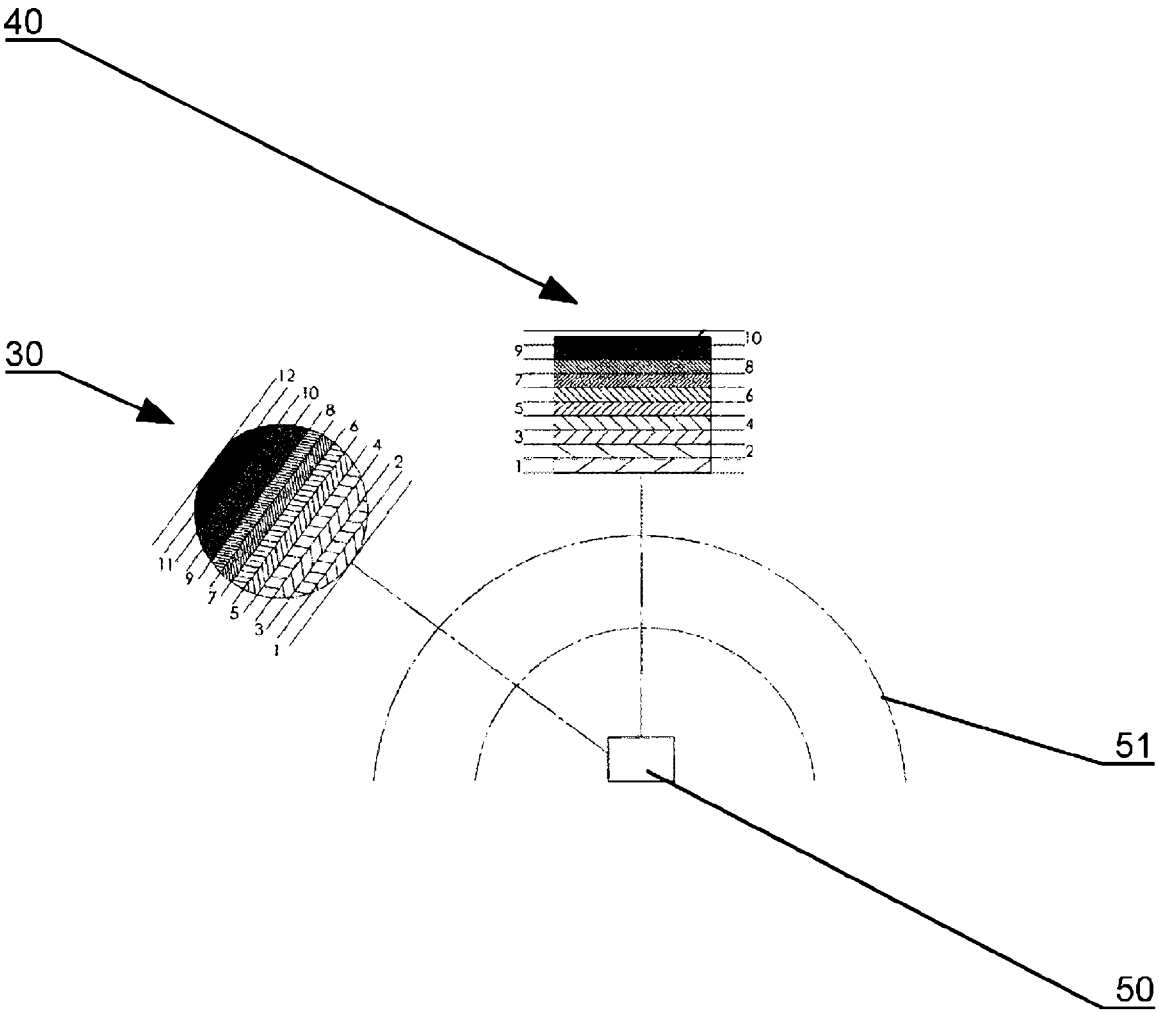

Fig. 2

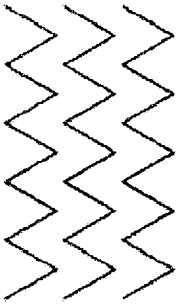

Fig. 3A

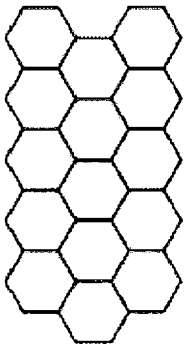

Fig. 3B

Fig. 3C

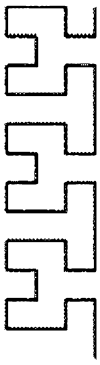

Fig. 3D

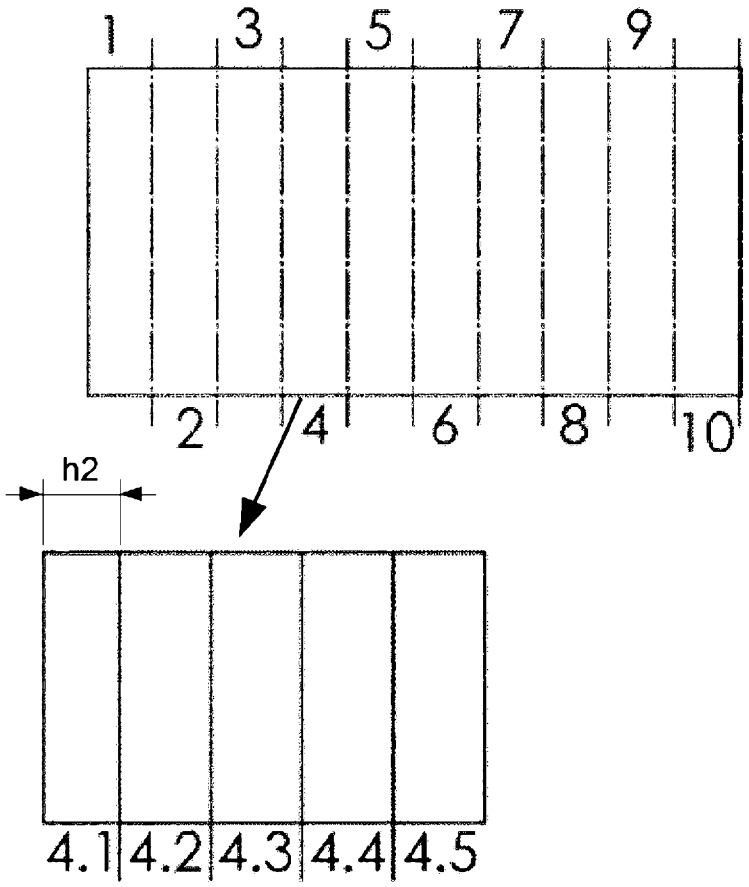

Fig. 4

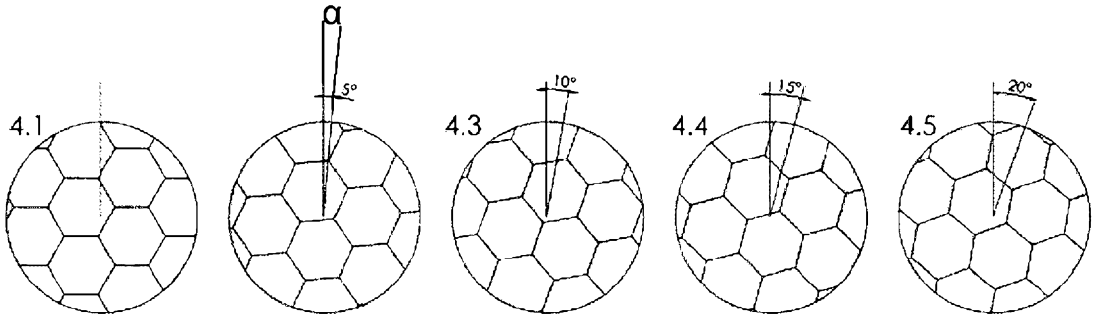

Fig. 5